Agosto 1988
Numero 240
Anno XXI
Volume XLI

La Direttiva «Seveso»

Emanato dalla Comunità economica europea allo scopo di controllare il rischio di gravi incidenti industriali, il provvedimento rappresenta uno dei casi più interessanti di politica ambientale a livello sovranazionale

di Marco A. Loprieno

La formalizzazione del controllo dei rischi legati agli incidenti industriali è un atto di vera e propria politica ambientale compiuto dalla Comunità europea attraverso la Direttiva 82/501/CEE del 24 giugno 1982. La Direttiva, correntemente chiamata «Seveso» dall'incidente accaduto allo stabilimento Icmesa il 10 luglio 1976, si presenta come un importante caso di studio sia perché consente di fare un confronto sulle modalità con cui essa viene applicata negli Stati membri, sia perché rappresenta un banco di prova per la capacità della Comunità di introdurre un sistema di regolamentazioni in un campo relativamente nuovo come quello del rischio di incidenti industriali rilevanti dovuti a processi di lavorazione chimica.

Regolamentazione dei rischi industriali

La possibilità di incidenti rilevanti è un dato di fatto sempre più frequente nella nostra società industriale. I principali rischi industriali che possono avere un impatto sull'ambiente sono i rischi associati a sostanze pericolose (rischio chimico). In questo campo si sono già avute catastrofi e devastazioni che hanno interessato migliaia di ettari di territorio con gravissimi danni per l'ambiente e per le popolazioni circostanti gli impianti.

Il rischio di incidente rilevante aumenta proporzionalmente alla crescita degli impianti, alla loro concentrazione, alla tossicità dei prodotti, alla complessità dei processi di lavorazione, alla vicinanza dei centri abitati. Il caso di Bhopal, in India, dove nel 1984 in un impianto della Union Carbide per la produzione di isocianato di metile è avvenuta la fuoriuscita di 40 tonnellate del pericoloso gas, è la più grave catastrofe industriale per la quantità di vittime immediate, circa 2500 morti, e per il numero di invalidi, 8000, e di persone seriamente intossicate, più di 30 000. L'incidente è diventato ben presto emblematico anche per i dubbi sorti intorno alla gestione dell'impianto, al rispetto delle norme di sicurezza e alla mancanza di piani di emergenza. Il fatto che l'incidente sia avvenuto in un paese in via di sviluppo, in cui certamente non erano applicati gli stessi standard e le stesse misure di sorveglianza dei paesi industrializzati, non diminuisce la necessità di una seria considerazione del controllo dei rischi industriali.

Dopo il caso di Bhopal, infatti, si è rafforzata la convinzione che esista ben poco di accidentale nel caso di gravi incidenti industriali. Questi non sono il frutto di fatalità, ma piuttosto il prodotto di errori umani o di cattiva gestione dell'impianto. Inoltre, in tutti i casi in cui vi sono state vittime tra la popolazione circostante è stata rilevata la mancanza di informazione da parte dell'industria sia sulle sostanze pericolose in corso di produzione, sia su eventuali piani di emergenza.

Chiaramente non è possibile, né sarebbe ragionevole, ridurre i rischi industriali a zero, ma esiste comunque una serie di misure in grado di ridurre considerevolmente questi rischi riportandoli entro limiti accettabili. In questo

L'industria chimica si presenta come la principale fonte di rischi industriali. Il rischio di incidente aumenta proporzionalmente alla crescita degli impianti, alla loro concentrazione, alla tossicità dei prodotti, alla complessità dei processi di lavorazione, alla vicinanza dei centri abitati. Il rischio di grave incidente industriale sta diventando una eventualità che si produce sempre più spesso nelle società industriali. Tale problema non deve più essere considerato frutto di tragiche fatalità, ma deve essere regolato dalla comunità internazionale e dalle autorità nazionali. In questo senso si è mossa la Direttiva CEE 82/501 «Sui rischi di incidenti rilevanti connessi con determinate attività industriali» approvata dal Consiglio dei ministri delle Comunità europee il 24 giugno 1982. Tale direttiva, più nota come Direttiva «Seveso», doveva essere recepita dagli Stati membri entro l'8 gennaio 1984. In pratica la sua applicazione non è stata così puntuale, ma ha incontrato ritardi e opposizioni sia da parte delle miopi politiche nazionali, sia da parte delle *lobby* industriali. Ciononostante, la Direttiva «Seveso» rappresenta un esempio importante di strumento di regolamentazione severo, ma rispettoso delle esigenze produttive di una «nuova» industria chimica, più attenta alla protezione dell'ambiente. Nella fotografia, gli impianti di distillazione sotto vuoto e di cracking catalitico della raffineria, una parte del complesso industriale Montedison di Priolo, a 18 chilometri da Siracusa. Per le sue dimensioni e per l'entità delle produzioni lo stabilimento di Priolo può essere considerato l'insediamento chimico più importante delle regioni meridionali italiane.

senso l'interrogativo *how safe is safe enough?* non può essere risolto astrattamente, ma diviene parte integrante del processo complessivo di regolamentazione dei rischi all'interno delle società industriali. A tale elaborazione partecipa una serie di fattori diversi quali: le percezioni del pubblico, lo sviluppo di tecnologie sempre più avanzate e sicure, l'atteggiamento responsabile dell'industria, le politiche di controllo delle autorità competenti.

Nell'ambito della Comunità europea la normativa di regolamentazione dei rischi industriali prese le mosse dall'incidente accaduto nella fabbrica Icmesa di Seveso che comportò la liberazione nell'atmosfera di un potente veleno che ha anche effetti cancerogeni, la diossina. In precedenza si erano verificati altri gravi incidenti a Flixborough, in Gran Bretagna, e a Ludwigshafen, nella Germania Federale. Di conseguenza all'interno della Commissione delle Comunità europee venne avviato un processo di elaborazione che permise di giungere, il 24 giugno 1982, all'approvazione della Direttiva CEE 82/501 sui rischi di incidenti rilevanti connessi con determinate attività industriali.

Il fatto che il provvedimento sia una misura legislativa delle Comunità europee implica il riferimento al Trattato di Roma del 1957 istitutivo della CEE e, in particolare, all'articolo 100 che mira a proteggere e rafforzare il Mercato comune proibendo barriere di carattere tecnico al commercio interno. In pratica questo avviene attraverso una armonizzazione dei regolamenti e dei provvedimenti legislativi nei 12 Stati membri.

Tale impostazione è avvalorata anche dalla recente ridefinizione del Trattato di Roma che, al momento della sua formulazione nel 1957, non aveva alcun riferimento esplicito alla politica ambientale. Si è finalmente rimediato a questa situazione nel 1986 attraverso il cosiddetto «Atto unico europeo» che giustifica legalmente la politica di difesa dell'ambiente formalizzandola nel titolo VII del Trattato.

La Direttiva Seveso doveva essere recepita dagli Stati membri entro l'8 gennaio 1984. Proprio per la sua particolarità di direttiva il provvedimento richiede l'intervento attivo delle autorità nazionali per fissare i regolamenti e le azioni amministrative necessarie alla sua applicazione. Gli Stati membri hanno comunque un potere discrezionale limitato al momento di applicare una direttiva che, laddove è esplicita, non può essere disattesa dalle legislazioni nazionali. Il compito della Commissione CEE è proprio quello di controllare la corretta applicazione di una direttiva a livello nazionale e costringere gli Stati membri a conformarsi alle misure comunitarie.

La particolarità della Direttiva Seveso è quella di definire un piano di livello minimo comune a tutti gli Stati membri per la protezione da incidenti industriali gravi, ma allo stesso tempo non impone un tetto per il livello di protezione. Ogni Stato membro è esplicitamente incoraggiato ad adottare più alti livelli di protezione se questa è la sua scelta.

In pratica l'applicazione della Direttiva Seveso non è stata così puntuale; in alcuni paesi è stata addirittura disattesa, a causa di una miope politica ambientale fatta di ritardi burocratici e amministrativi, ma anche della pressione delle *lobby* chimiche nazionali. L'Italia, per esempio, fino a poco tempo fa non aveva ancora recepito la Direttiva provocando mancanze gravi nel proprio sistema di controllo dei rischi industriali.

La recente proposta di Decreto presidenziale passata al vaglio della Camera e del Senato e approvata dal Consiglio dei ministri il 13 maggio scorso segna finalmente il recepimento da parte italiana, sanando una situazione che vedeva nel nostro paese l'unico Stato membro della Comunità a non avervi ancora provveduto.

Le ragioni di tale stato di cose possono essere individuate nella frammentazione del controllo del rischio industriale fra diversi organi istituzionali, in particolare i Ministeri della sanità, dell'industria, degli interni e della protezione civile, e nella sua conseguente disorganizzazione e inefficienza. A questa situazione va aggiunta la sostanziale incomprensione dimostrata da parte dell'industria chimica che solo ultimamente - si veda il caso della Farmoplant - ha capito la necessità di avere anche nel nostro paese una certezza del diritto compatibile con le norme comunitarie relative al controllo del rischio industriale. Il recepimento della Direttiva Seveso segna anche un indubbio successo personale per il Ministro dell'ambiente Giorgio Ruffolo, promotore principale dell'iniziativa.

Restano comunque alcuni elementi di compromesso a livello di applicazione, laddove la gestione del controllo dei rischi industriali rimane affidata al concerto dei Ministeri dell'ambiente e della sanità. D'altra parte questa è una situazione istituzionale comune alla maggior parte degli Stati membri. Si tratta ora di passare dall'ambito puramente formale a quello dell'applicazione.

Definizione delle attività industriali

La Direttiva 82/501 pone all'art. 1 una serie di definizioni importanti per specificarne il campo di azione e la portata. A questo proposito viene definita come attività industriale oggetto della regolamentazione qualsiasi operazione effettuata negli impianti elencati nell'allegato I che comporti l'uso di uno o più sostanze pericolose e, di conseguenza, la possibilità di incidenti rilevanti. Viene anche preso in considerazione il trasporto entro lo stabilimento di tali sostanze e l'immagazzinamento all'interno dello stesso.

Gli impianti industriali chimici elencati nell'allegato I sono raggruppati in sei categorie. 1) Impianti per la produzione o trasformazione di sostanze chimiche organiche o inorganiche che facciano uso di una serie di procedimenti, tra cui, per esempio, alchilazione, condensazione, alogenazione, ossidazione, solfonazione, formulazione di antiparassitari e prodotti farmaceutici ecc. Nella stessa categoria rientrano impianti per il trattamento di sostanze chimiche organiche e inorganiche che facciano uso dei seguenti procedimenti: distillazione, estrazione, solubilizzazione, miscelazione. 2) Impianti per la distillazione o raffinazione del petrolio o dei prodotti petroliferi. 3) Impianti destinati all'eliminazione totale o parziale di sostanze solide o liquide mediante combustione o decomposizione chimica. 4) Impianti per la produzione o il trattamento di gas energetici. 5) Impianti per la distillazione a secco di carbon fossile e lignite. 6) Impianti per la produzione di metalli o metalloidi per via umida o mediante energia elettrica.

Rispetto a questo elenco è necessario notare come con la Direttiva CEE 87/216 del marzo 1987 siano state apportate alcune modifiche particolarmente rispetto al punto 1, laddove si afferma che anche tutte le altre operazioni che potrebbero essere effettuate per la produzione, la trasformazione e il trattamento di prodotti chimici organici e inorganici sono da considerarsi incluse nell'elenco.

Nella definizione di attività industriale rientra anche qualsiasi deposito, all'interno dell'impianto stesso, effettuato nelle condizioni specificate nell'allegato II. Questo elenca nove diverse sostanze o categorie di sostanze per le quali sono previste precise soglie quantitative di sicurezza per l'immagazzinamento. Le sostanze sono: gas infiammabili, liquidi facilmente infiammabili, acrilonitrile, ammoniaca, cloro, biossido di zolfo, nitrato di ammonio, clorato di sodio e ossigeno liquido. La Direttiva emanata nel marzo 1987 ha aggiunto il triossido di zolfo e ha modificato alcune soglie di sicurezza.

Sempre nell'art. 1 viene data la definizione di incidente rilevante inteso come un evento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di rilievo, connesso a uno sviluppo incontrollato di un'attività industriale che comporti l'uso di una o più sostanze pericolose e che dia origine a un pericolo grave, immediato o differito, per l'uomo, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e/o per l'ambiente.

Le sostanze pericolose sono definite come quelle rispondenti ai criteri indicativi messi a punto nell'allegato IV; queste formano quattro gruppi: *a*) sostanze molto tossiche, *b*) sostanze tossiche, *c*) sostanze infiammabili, *d*) sostanze capaci di esplodere. Nell'allegato III viene definita, inoltre, una lista di 178, poi portate a 180, sostanze pericolose con relative soglie quantitative.

L'incidente occorso il 10 luglio 1976 nella fabbrica Icmesa di Seveso (Milano) comportò la liberazione nell'atmosfera di diossina, una sostanza fortemente tossica e cancerogena. L'evento provocò l'evacuazione di un centinaio di famiglie e l'abbandono del territorio per la grave contaminazione ambientale. Da questa catastrofe prese il nome la Direttiva 82/501, che paradossalmente non è stata recepita formalmente nel nostro paese sino al 17 maggio 1988. Nel frattempo si sono verificati in Italia altri gravi incidenti: a Napoli nel dicembre 1985 si incendiò un deposito AGIP nella zona portuale, 72 000 tonnellate di combustibile andarono in fumo e si ebbero quattro morti, decine di feriti, circa 2000 sfollati; a Genova il 15 maggio 1987 scoppiò un deposito di alcool metilico causando la morte di quattro operai. La fotografia di Dino Fracchia/Grazia Neri mostra i lavori di bonifica a seguito dell'incidente di Seveso.

Continuando in questa serie di precisazioni sono esclusi dalla applicazione della Direttiva: 1) gli impianti nucleari e di trattamento di sostanze e materiali radioattivi; 2) le installazioni militari; 3) le fabbricazioni e il deposito separato di esplosivi; 4) le attività estrattive e minerarie; 5) gli impianti per lo smaltimento dei rifiuti tossici e pericolosi a patto che siano già oggetto di regolamentazione comunitaria intesa a prevenire incidenti rilevanti.

Struttura della Direttiva

Passando ad analizzare la struttura della Direttiva, dopo questa serie di definizioni, possiamo considerarla divisa in due parti corrispondenti a due diversi campi di applicazione.

La prima parte rappresenta un quadro generale di requisiti riguardanti ogni attività svolta in un impianto industriale che richiede o possa richiedere l'uso di una o più sostanze tossiche, infiammabili o esplosive, capaci di provocare pericoli gravi sia per i lavoratori sia per le popolazioni e l'ambiente circostante. Secondo questa parte della Direttiva, gli industriali devono dimostrare alle autorità competenti di essere in grado di identificare gli eventuali rischi che possono provocare incidenti, adottando di conseguenza le appropriate misure di sicurezza e fornendo ai lavoratori informazioni, addestramento ed equipaggiamento adeguati per il miglioramento della loro sicurezza.

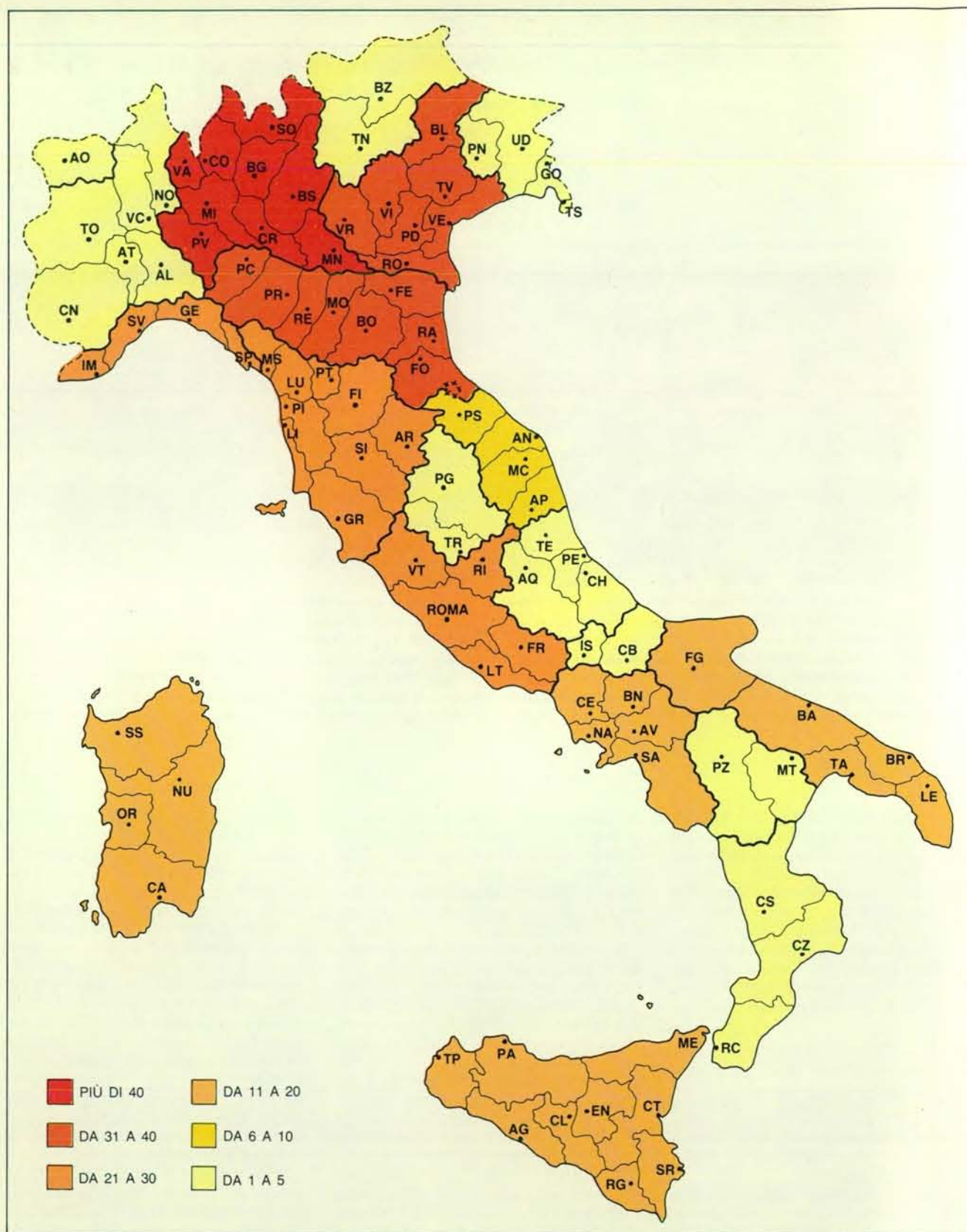
La seconda parte costituisce un insieme di misure più specifiche. Sulla base degli elenchi di prodotti chimici degli allegati II e III, la Direttiva identifica alcune attività industriali che sono soggette a controlli sistematici quando questi prodotti sono o possono essere presenti in eccesso rispetto a una quantità fissa. In questo senso, l'applicazione della Direttiva risponde all'esigenza di chiarire gli obblighi del fabbricante e semplificare i controlli delle autorità competenti.

Il controllo sistematico secondo questa parte della Direttiva è basato sulla procedura di notifica che il fabbricante sottoporrà all'esame delle competenti autorità nazionali. Questa comprende uno studio dettagliato contenente informazioni riguardanti: *a*) le sostanze e i procedimenti adottati, le forme in cui possono presentarsi o trasformarsi in caso di anomalie prevedibili, le possibilità di rischio e le precauzioni; *b*) la localizzazione degli impianti, i gruppi esposti, le fonti di rischio e le misure preventive; *c*) le situazioni di possibili incidenti rilevanti, i piani di emergenza, i sistemi di allarme e ogni tipo di risorse per far fronte a incidenti gravi.

I Governi nazionali sono chiamati in causa per quanto riguarda la supervisione e il controllo dell'applicazione della Direttiva. In vista di questo risultato sono state istituite a livello nazionale le autorità competenti a ricevere le notifiche di sicurezza da parte dei fabbricanti, secondo l'art. 5. In particolare, esse devono valutare le misure di sicurezza scelte dal fabbricante e supervisionare la loro efficienza e la loro applicazione. Inoltre devono assicurarsi che sia stato preparato un piano di emergenza riguardante l'area circostante l'impianto.

Se necessario, le autorità competenti possono richiedere ulteriori informazioni e devono controllare che il fabbricante abbia preso le misure di sicurezza più appropriate rispetto alle varie operazioni di quella attività industriale per la quale è stata fatta la notifica. Le autorità devono inoltre organizzare ispezioni e altre misure di controllo in accordo con le legislazioni nazionali.

Nel caso di un incidente rilevante i Governi nazionali devono inviare alla

PIÙ DI 40
DA 31 A 40
DA 21 A 30
DA 11 A 20
DA 6 A 10
DA 1 A 5

Nel 1985 il Ministero della sanità ha condotto un censimento nazionale delle industrie ad alto rischio. Secondo i dati rilevati dal censimento sarebbero state individuate 391 imprese industriali che risultano manipolare o produrre sostanze altamente pericolose. La distribuzione di queste 391 imprese ad alto rischio interessa più o meno tutto il territorio italiano con una frequenza massima del 12,8 per cento in Lombardia e una frequenza minima dello 0,3 per cento nel Trentino-Alto Adige e nel Molise. Si ritiene da più parti che tale censimento, a carattere puramente volontario, rappresenti una sottostima della situazione reale. Tale iniziativa ha rappresentato comunque l'unica misura concreta di recepimento della Direttiva «Seveso» presa dal nostro Governo sino allo scorso 17 maggio quando, tramite Decreto n. 175 del Presidente della Repubblica, essa è stata finalmente formalizzata nel nostro ordinamento.

Commissione CEE, al più presto, un rapporto dettagliato sull'incidente. Inoltre devono assicurarsi che tutte le misure di sicurezza e di emergenza siano state prese. Devono inoltre raccogliere tutte le informazioni necessarie a una più ampia valutazione dell'incidente.

Secondo la Direttiva Seveso, le responsabilità dei fabbricanti consistono principalmente nel prevenire o limitare gli incidenti gravi identificando i pericoli potenziali e adottando le misure di sicurezza appropriate. I compiti del fabbricante divengono più sostanziali e specifici se sono presenti le sostanze pericolose elencate nell'allegato III alla Direttiva. In questo caso la notifica contenente l'informazione relativa alle sostanze, agli impianti e alle possibili situazioni di incidenti gravi deve essere inviata alla competente autorità nazionale. Il fabbricante deve quindi preparare un'esauriente analisi di rischio rispetto all'affidabilità dell'impianto.

Il ruolo della Commissione CEE

Il ruolo della Commissione CEE consiste nell'assicurare che la Direttiva sia correttamente applicata in tutti gli Stati membri. Al di là del compito formale, la Commissione svolge un ruolo cruciale nel controllare che la Direttiva sia effettivamente applicata. Questo è possibile attraverso un attivo scambio di informazioni a livello comunitario sull'applicazione pratica delle misure previste, riguardo a tutti gli aspetti scientifici e tecnici e alle attività che la Direttiva impone. A questo proposito la Commissione tiene riunioni regolari, circa ogni tre mesi, a Bruxelles, con le autorità nazionali competenti.

Nel quadro dell'applicazione della Direttiva sono importanti anche altre attività svolte dalla Commissione. Infatti questa tiene aggiornata una banca dati sugli incidenti rilevanti, che comprende anche l'analisi delle cause e l'insegnamento che se ne è potuto trarre in materia di sicurezza. Inoltre, la Commissione sta sviluppando una banca dati sulle sostanze chimiche pericolose coperte dalla Direttiva, che include fra l'altro anche informazioni sulle misure di emergenza e sulle precedenti esperienze di incidenti simili.

Per quanto riguarda il controllo sul campo dell'applicazione della Direttiva, la Commissione organizza regolari *workshop* per gli ispettori nazionali responsabili. Durante questi incontri vengono discussi argomenti tecnici sulla sicurezza e la valutazione dei rischi per assicurare il più possibile metodi comuni nell'applicazione e nel controllo della legislazione comunitaria.

In pratica, la Commissione delle Comunità europee agisce come un «catalizzatore» per lo scambio di informazioni e di esperienze sulla prevenzione degli incidenti maggiori, così come è previsto dall'art. 18, e anche per lo sviluppo di un patrimonio comunitario di esperienze rispetto alle tecnologie di sicurezza e alla valutazione dei pericoli.

Lo stato attuale di applicazione nei vari paesi

Passando dall'analisi della struttura della Direttiva Seveso alla sua effettiva applicazione, analizziamo in primo luogo le situazioni legislative nazionali. Possiamo dividere gli Stati membri in tre gruppi rispetto ai diversi provvedimenti che permettono di applicare la Direttiva. Ricordiamo che questa doveva essere recepita già a partire dall'8 gennaio 1984.

Il primo gruppo comprende tutti quei

L'incidente avvenuto a Bhopal, in India, il 3 dicembre 1984 con 2500 morti, 8000 invalidi e 30 000 seriamente intossicati rappresenta la più grave catastrofe provocata dall'industria chimica. Esso fu causato dalla fuoriuscita di isocianato di metile dall'impianto industriale della Union Carbide che appare in questa fotografia (Tannenbaum - Sygma/Grazia Neri). Nel novembre dello stesso anno un deposito di gas butano esplodeva a Città del Messico provocando più di 500 morti. Tali incidenti hanno riproposto drammaticamente il problema della regolamentazione dei rischi industriali anche nei paesi in via di sviluppo che, sino a questo momento, si sono dimostrati lassisti e che troppo spesso vengono utilizzati dalle grandi imprese multinazionali come sede di impianti che compiono lavorazioni considerate ormai eccessivamente pericolose per essere effettuate nei paesi economicamente più avanzati.

paesi (Germania Federale, Francia e Paesi Bassi) i cui provvedimenti legislativi in materia di incidenti rilevanti erano precedenti alla Direttiva. Di conseguenza, si sono resi necessari emendamenti alla legislazione per assicurare che tutti gli aspetti della Direttiva fossero coperti. Nei Paesi Bassi questo processo è ancora incompleto perché gli effetti ambientali di un incidente rilevante non sono coperti dai requisiti previsti dai cosiddetti «rapporti di sicurezza».

Il secondo gruppo è formato da quei paesi (Regno Unito, Danimarca, Irlanda) che hanno aspettato che la Direttiva fosse stata formalizzata prima di procedere all'emanazione di regolamenti nazionali, anche se questi erano sostanzialmente basati su provvedimenti legislativi precedenti. In questi paesi i regolamenti sono maggiormente conformi alla lettera della Direttiva.

Infine, quelle nazioni che sono ancora impegnate a introdurre i provvedimenti legislativi e i regolamenti necessari (Belgio, Grecia, Italia, Lussemburgo) costituiscono il terzo gruppo. Un caso a parte costituiscono la Spagna e il Portogallo che usufruiscono di un ulteriore periodo di transizione per adeguarsi all'intero *corpus* legislativo comunitario.

È chiaro che le differenti strutture amministrative e la presenza o meno di provvedimenti legislativi nazionali sulla materia preesistenti alla Direttiva comportano una serie di emendamenti e di ritardi alla sua applicazione.

I rapporti di sicurezza

Considerando l'insieme dei vari elementi della Direttiva, i sopra menzionati rapporti di sicurezza sono, come si può comprendere, fondamentali nel provvedere l'informazione di base per soddisfare i requisiti della Direttiva e concentrare l'attenzione del fabbricante sulla prevenzione degli incidenti. La Direttiva non richiede, per gli impianti esistenti, che questi siano sottoposti alle autorità competenti fino all'8 luglio 1989.

Il numero dei siti per i quali si devono produrre i rapporti di sicurezza varia da 10, nel caso della Grecia, a più di 1000 per quanto riguarda la Germania Federale. Comunque, dobbiamo considerare che il numero dei rapporti richiesti è più grande del numero dei siti pericolosi. Per esempio, in Francia 328 siti devono produrre 600 rapporti, nei Paesi Bassi 90 siti produrranno 270 rapporti e nel Regno Unito 270 siti produrranno 500 rapporti. Questa situazione è causata sia dalla necessità per alcuni siti di avere rapporti di sicurezza aggiuntivi, sia dal fatto che più rapporti possono essere richiesti per coprire diversi processi di lavorazione svolti nello stesso sito.

I rapporti di sicurezza rappresentano una novità per la maggior parte degli Stati membri, ma sia la Francia sia la Germania sia i Paesi Bassi avevano già adottato procedimenti simili prima che la Direttiva fosse stata formalizzata. Ne consegue che a livello comunitario tale elemento porterà verso un miglioramento generale rispetto alle pratiche vigenti.

L'uso di *guideline* e di modelli sta diventando crescente per quanto riguarda l'elaborazione dei rapporti di sicurezza, con la tendenza a quantificare i rischi degli impianti pericolosi. Di fatto non esiste alcun accenno della Direttiva in questo senso: ciononostante diversi Stati membri stanno incoraggiando l'uso di tecniche quantitative di *risk-assessment* per la produzione dei rapporti di sicurezza più che di tecniche qualitative. A questo proposito, rimane da valutare se i rapporti si debbano indirizzare sempre più verso analisi concrete delle conseguenze degli incidenti rilevanti, o piuttosto verso astratti studi probabilistici, quali per esempio il rischio di incidente provocato dalla caduta di un aereo sul tetto di una fabbrica.

I piani di emergenza

I piani di emergenza riguardanti l'impianto al suo interno (*on-site*), che possono fare parte del rapporto di sicurezza, non sono richiesti sino all'8 luglio 1989. La maggior parte degli Stati membri dovrà introdurre nuove misure legislative per adeguarsi alla Direttiva; alcuni Stati, comunque, hanno già provveduto in materia. In Francia, per esempio, esisteva già una misura analoga per piani di emergenza *on-site* per quanto riguardava l'industria petrolifera; la Direttiva ha avuto, quindi, l'effetto di estendere questo requisito a molte altre industrie.

La Commissione delle Comunità europee, il principale organo amministrativo, svolge il proprio ruolo propositivo presentando al Consiglio dei ministri della Comunità il materiale necessario per elaborare decisioni, raccomandazioni, direttive e regolamenti per gli Stati membri. Il Consiglio costituisce quindi l'elemento propriamente decisionale al quale devono fare riferimento tutti gli Stati della Comunità. Lo strumento più usato in proposito per coinvolgere gli Stati membri è la direttiva, che permette una maggiore elasticità, delegando ai singoli Stati gli strumenti e le modalità riguardanti l'applicazione di quanto è stato deciso a livello comunitario. Lo schema mostra l'iter seguito da una direttiva dal momento della proposta alla sua adozione da parte dei singoli Stati.

Il caso della Farmoplant, l'industria chimica che si è vista ritirare la licenza dei suoi principali prodotti in seguito a un referendum popolare promosso dai gruppi ambientalisti, ripropone il problema di un corretto rapporto di informazione tra industria chimica e pubblico, sia rispetto ai rischi di eventuali incidenti, sia rispetto ai necessari piani di emergenza. Mancando questo rapporto di fiducia, esplicitamente previsto dalla Direttiva Seveso, si deve fare ricorso a forme che possono apparire estreme per tutelare la sicurezza delle popolazioni. Nella fotografia di Luciano Cremascoli/Overseas, manifestazione di protesta a Massa nel gennaio 1988.

Spetta al fabbricante produrre il piano di emergenza e pagare per esso, anche se può ricevere assistenza di carattere generale dalle autorità competenti. Nella Germania Federale e nel Regno Unito sono stati prodotti tutti i piani di emergenza *on-site*; la situazione in Francia e in Irlanda è anch'essa in uno stato avanzato; nei Paesi Bassi esistono approssimativamente 30 piani di emergenza in funzione attualmente. Negli altri Stati membri vi sono pochi piani di emergenza *on-site* veramente effettivi.

Riguardo ai piani di emergenza esterni all'impianto (*off-site*) permane una certa ambiguità nella Direttiva sulla loro entrata in vigore (nel 1985 o entro l'8 luglio 1989). Alcuni Stati membri (Irlanda e Regno Unito) hanno anticipato questa ultima data di presentazione, mentre altri paesi come la Francia hanno già preso da molto tempo provvedimenti in questo campo. Nei Paesi Bassi esistono requisiti per piani di emergenza a livello municipale in caso di disastro, ma si tratta di misure di carattere generale. Anche nella Germania Federale esistono piani di emergenza sempre a carattere generale, ma solo in alcuni *Länder* questi sono richiesti per impianti specifici. Prima della Direttiva Seveso non esistevano requisiti specifici per tali piani di emergenza in Belgio, Grecia, Irlanda, Italia, Lussemburgo e Regno Unito.

L'ente amministrativo che è responsabile del controllo e dell'attuazione dei piani *off-site* varia da paese a paese, ma di solito si tratta di una autorità locale. Tale agenzia non sempre è responsabile per le spese di attuazione dei piani. Nel Regno Unito, e probabilmente nel Lussemburgo, in Italia e in Grecia, spetta al fabbricante l'onere delle spese. In altri paesi è lo Stato che provvede a livello locale e nazionale.

I piani di emergenza *off-site* sono stati pressoché completati nel Regno Unito. In Germania Federale e nei Paesi Bassi devono ancora essere messi a punto specifici piani. In altri paesi la maggior parte dei piani deve ancora essere prodotta, o perché una data di presentazione non è ancora stata fissata (Lussemburgo, Italia, Grecia) o perché si fa riferimento, è il caso della Francia, alla data del 1989.

Le zone coperte dai piani di emergenza variano ugualmente da paese a paese. In Danimarca sono utilizzati confini fissati dalle autorità locali o dalla polizia; nel Regno Unito sono utilizzati parametri di diverso tipo; per quanto riguarda la Germania Federale viene utilizzato un altro sistema di piani di emergenza nei confronti del pericolo di esplosioni e di emissioni.

Teoricamente tali piani sono documenti di pubblico accesso in alcuni paesi (Danimarca, Francia, Germania Federale e Paesi Bassi); comunque le parti che contengono informazioni confidenziali non vengono rese pubbliche. Esiste un indirizzo generale di protezione dell'ambiente in quasi tutti i piani *off-site*, ma alcuni piani sono principalmente rivolti alla protezione della popolazione. Sembra ovvio considerare i due piani di emergenza, *on-* e *off-site*, complementari l'uno all'altro, e di fatto questa è la regola generale, ma non esistono provvedimenti in questo senso in Belgio, Danimarca e Lussemburgo. In generale, non essendo la maggior parte dei piani ancora in funzione, è molto difficile valutarne l'efficacia, che d'altra parte può venire considerata appieno solamente nel caso di un effettivo incidente.

Per quanto riguarda l'ispezione degli impianti, tutti gli Stati membri avevano già servizi di ispezione prima del recepimento della Direttiva; ciononostante, Regno Unito, Lussemburgo, Irlanda e Grecia hanno introdotto o stanno introducendo nuovi provvedimenti legislativi che modificano i compiti degli organi ispettivi. Le autorità competenti per le

ispezioni sono poi le stesse preposte al controllo dei rapporti di sicurezza.

Dati i due orientamenti principali della Direttiva, che si applica sia alla protezione dell'uomo sia a quella dell'ambiente, gli organi ispettivi dovrebbero essere in grado di occuparsi di questioni di sicurezza e di salute così come di problemi ambientali. In Belgio e Danimarca questo viene realizzato attraverso servizi separati di ispezione; in Francia e in Germania Federale l'ispettorato è in grado di affrontare ambedue le tematiche, ma in Germania l'esperienza dell'ispettorato in materia di protezione ambientale non è allo stesso livello di quella raggiunta in materia di salute e sicurezza. Nel Regno Unito l'ispettorato sta gradualmente allargando le sue competenze al campo della protezione ambientale. Nei Paesi Bassi l'ispettorato del lavoro sta limitando la sua azione allo studio degli effetti sull'uomo di gravi incidenti industriali, mentre la responsabilità per eventuali conseguenze sull'ambiente sarà di competenza di un ispettorato ambientale che deve ancora essere approvato con provvedimento legislativo.

Informazione del pubblico

Assicurare una corretta informazione del pubblico in materia di sicurezza degli impianti industriali è un altro dei compiti affidati alle autorità nazionali. Si tratta di una novità per la maggior parte degli Stati membri, che devono introdurre nuovi provvedimenti legislativi per soddisfare quanto previsto dalla Direttiva Seveso. La data entro la quale il pubblico doveva essere informato sui rischi delle lavorazioni industriali e sui diversi piani di emergenza era fissata all'8 gennaio 1985, ma in pratica questo non è avvenuto in alcun paese.

In questo senso deve essere fatta una importante distinzione tra paesi che informano il pubblico in una maniera attiva, per esempio per lettera o attraverso i mezzi di comunicazione di massa, e paesi che invece utilizzano metodi «passivi» di comunicazione, per esempio rendendo pubblico l'accesso alle informazioni del sistema di autorizzazione delle licenze per gli impianti industriali. In generale, possiamo dire che l'informazione passiva non può soddisfare gli obblighi stabiliti dalla Direttiva, che prescrive espressamente che il pubblico sia informato rispetto alla condotta da tenere in caso di grave incidente industriale.

La zona entro la quale il pubblico deve essere informato varia da Stato a Stato; si ritiene che essa debba coincidere con quella dei piani di emergenza *off-site*, ma nella maggior parte dei casi interessa anche l'area della comunità locale. Infine, il costo dell'informazione del pubblico è sostenuto dal fabbricante in cinque paesi; nel resto degli Stati membri le spese sono a carico dello Stato o delle autorità locali.

La maggior parte degli Stati membri, a parte la Francia e la Germania Federale che già avevano provvedimenti legislativi in proposito, ha introdotto nuove misure legislative che riguardano l'informazione rispetto agli incidenti rilevanti. Dobbiamo però notare come venga deciso solamente in un secondo tempo, quando l'incidente è già avvenuto, se questo sia da considerarsi grave oppure no. Questo non dovrebbe comunque impedire la tempestiva messa in atto dei piani di emergenza *off-site* e dell'informazione al pubblico. In realtà l'intero problema della definizione di quando un incidente debba considerarsi rilevante rimane ancora irrisolto. Gli Stati membri hanno scelto di interpretare la definizione presente nella Direttiva in una varietà di significati. Per esempio il termine «rilevante» non fa parte della definizione della Germania Federale che concerne il concetto di rischio pubblico. Infine, non esistono spesso criteri specifici per valutare il danno ambientale. Fra l'approvazione della Direttiva (1982) e il gennaio 1987 risulta siano stati comunicati alla Commissione incidenti gravi da Francia, Germania Federale, Danimarca, Grecia e Regno Unito.

Revisione ed estensione della Direttiva

Passando a una analisi conclusiva della situazione di applicazione, possiamo affermare che il rapporto di sicurezza è il requisito più importante della Direttiva Seveso. Molti rapporti di sicurezza non saranno pronti sino al luglio 1989 e solo allora le autorità nazionali competenti saranno in grado di esaminarli e assicurare criteri di coerenza. Questi devono senza dubbio essere presenti all'interno dei singoli paesi, ma si renderà necessario anche trovare standard comuni nei paesi confinanti, nel caso di incidenti con conseguenze transfrontaliere. La stessa coerenza dovrebbe anche essere estesa ai piani interni di emergenza.

Esistono dubbi reali sulle capacità delle autorità competenti a far fronte a un crescente carico di lavoro date le limitazioni di risorse umane a disposizione. Questo sembra possa essere il caso di Belgio, Germania Federale, Grecia, Francia, Lussemburgo e Regno Unito. A questo scopo si renderà necessario rafforzare il personale ispettivo sia a livello degli Stati membri, sia a livello comunitario.

La definizione di incidente grave andrebbe rivista data la quantità di interpretazioni adottate dagli Stati membri e data la circolarità della definizione adottata dalla Direttiva. Questo potrebbe anche rivelarsi come un ulteriore elemento di coerenza nella procedura di comunicazione di incidenti alla Commissione CEE. Nello sviluppare una nuova definizione si deve tenere presente il fatto che solo occasionalmente accadono incidenti che non presentino pericolo per le persone in quanto danneggiano solo l'ambiente.

Incidenti gravi possono accadere in siti che non sono sottoposti ai requisiti specifici della Direttiva, per esempio nel caso in cui sostanze chimiche siano immagazzinate in depositi al di fuori degli impianti industriali. Altri casi di rischio possono verificarsi quando le quantità delle sostanze pericolose in deposito sono al di sotto delle soglie previste dalla Direttiva, ma possono comunque rappresentare un pericolo se in caso di incidente vengono a contatto con altre sostanze pericolose presenti nel deposito. Un altro rischio non previsto dalla Direttiva è quello della concentrazione di più impianti o depositi nella stessa area il che, in caso di incidente, può provocare il cosiddetto effetto «domino».

Rispetto al problema dello stoccaggio delle sostanze pericolose, insufficientemente trattato nella Direttiva Seveso, lo speciale comitato responsabile del controllo dei rischi industriali alla Direzione generale ambiente, sicurezza nucleare e protezione dei consumatori (DG XI) della Commissione CEE ha già iniziato un'opera di revisione della Direttiva stessa. La causa di questa revisione è stato l'incidente accaduto in un deposito di prodotti chimici della Sandoz a Schweizerhalle vicino a Basilea in Svizzera nel novembre 1986. Nel deposito, al momento dell'incendio, si trovavano un migliaio di tonnellate di prodotti, principalmente insetticidi. Le acque usate per domare le fiamme hanno trasportato nel vicino fiume Reno fra le 10 e le 30 tonnellate di sostanze chimiche provocando una vera e propria catastrofe ecologica. Un più recente caso di incidente rilevante dovuto alle stesse cause è accaduto a Nantes nel novembre 1987. Un incendio è scoppiato in un deposito nella zona del porto dove si trovavano 850 tonnellate di prodotti chimici.

Rispetto al processo di informazione del pubblico è necessario ribadire come questo debba essere condotto in maniera positiva e attiva. Inoltre l'informazione deve essere continua e ripetuta.

Infine devono essere assicurate la più alta compatibilità e coerenza tra i piani di emergenza, l'informazione del pubblico e il rapporto di sicurezza da cui deve provenire la maggior parte dei dati. Le autorità preposte al controllo di questi diversi settori non sono sempre le stesse; ne consegue l'esigenza della più ampia interrelazione tra i vari elementi.

In conclusione possiamo affermare che la Direttiva Seveso rappresenta un passo estremamente importante all'interno della politica europea di regolamentazione dei prodotti chimici. Il successo di questa iniziativa è la prova della necessità di elaborare un quadro di riferimento per il controllo del rischio industriale in un ambito sovranazionale come la Comunità europea. A questo punto si rende però necessario espandere l'applicazione della Direttiva al di là dei confini comunitari per prevenire gli incidenti che possono avere conseguenze transfrontaliere. La Commissione CEE si sta muovendo in questo senso; infatti, dopo l'incidente di Basilea sono in corso trattative tra la Commissione CEE e la Svizzera, la quale si è impegnata ad adottare una normativa analoga alla 82/501. Anche nell'ambito dei paesi dell'OCSE (l'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico) una recente riunione del febbraio 1988 ha posto le basi per un più ampio recepimento della normativa comunitaria sul controllo dei rischi industriali.

In generale, possiamo dire che la Direttiva ha stimolato una grande attività legislativa da parte degli Stati membri, svolgendo un ruolo senza dubbio positivo. Rispondendo a elementi comuni anche ad altre iniziative della politica ambientale della CEE, ha innescato un processo di adeguamento fra i diversi paesi, tanto che anche quelli meno avanzati dal punto di vista della protezione ambientale sono portati ad allinearsi progressivamente a quegli Stati in cui la coscienza ecologica è più forte.

La Direttiva 82/501 ha fatto inoltre in modo che le industrie e le autorità responsabili avessero l'esigenza di mettere a punto rapporti di sicurezza e piani di emergenza. Questi, a loro volta, dovrebbero portare allo sviluppo di procedimenti più avanzati per ridurre i rischi industriali. Rimane, comunque, ancora molta strada da fare per soddisfare completamente tutti gli obblighi sanciti dalla Direttiva Seveso.

BIBLIOGRAFIA

OTWAY HARRY e PELTU MALCOLM (a cura), *Regulating Industrial Risks*, Butterworths, Londra, 1985.

TESTORI COGGI PAOLA, *Protecting the Public Against Hazards from Chemicals* in *Extension of European Chemicals Control Policies Through International Harmonisation and the Programmes of International Organizations* a cura dell'Institute for European Environmental Policy, Bonn, Parigi, Londra, 1986.

SMETS HENRI, *L'Importance Croissante des Risques Industriels* in «Environmental Policy and Law», pp. 231-47, 17 giugno 1987.

LOPRIENO NICOLA, *La normativa italiana. Mancanze e attese nel controllo dei rischi industriali* in «Ambiente risorse salute», n. 68, ottobre 1987.

INSTITUTE FOR EUROPEAN ENVIRONMENTAL POLICY, *Implementation of Directive 82/501/EEC in the First Five Years After Its Adoption*, Bonn, Parigi, Londra, 1987.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, *The European Community and Major-Accident Hazards*, Bruxelles, 1988.

Le «snurp»

Queste piccole ribonucleoproteine nucleari danno un contributo al fondamentale processo di scissione e saldatura mediante il quale vengono rimosse dal codice di informazione genetica le sequenze prive di senso

di Joan Argetsinger Steitz

Undici anni fa trascorsi gran parte del mio anno sabbatico lontano dalla Yale University in una ricerca in ultima analisi infruttuosa. Stavo cercando di produrre anticorpi che si legassero a una curiosa classe di molecole proteiche, presenti nel nucleo delle cellule di mammifero. Nessuno sapeva che cosa facessero esattamente quelle molecole, ma io sospettavo che si trattasse di importanti composti intermedi lungo la via biochimica che dai geni conduce alle proteine. Volevo usare gli anticorpi per bloccarne l'attività e, quindi, fare luce sulla loro funzione.

Se il successo viene misurato da quanto si riesce a ottenere di ciò che ci si era prefissi, allora il mio fu un misero fallimento. Non riuscii mai a isolare gli anticorpi specifici verso quelle misteriose proteine. Ma meno di un anno dopo il mio collega Michael R. Lerner e io ci imbattemmo in un tipo del tutto nuovo di componenti nucleari che risultarono essere proprio importanti mediatori dell'espressione genica. Si tratta di piccoli complessi di RNA (un derivato del DNA) e di una varietà di proteine, che abbiamo deciso di chiamare piccole ribonucleoproteine nucleari (snRNP, acronimo di *small nuclear ribonucleoprotein*, all'inglese «snurp»).

Esistono molti diversi tipi di snRNP, ma per ora conosciamo le funzioni di poche di esse; si è già osservato comunque che queste particolari proteine rivestono un'importanza vitale nell'attività cellulare. Le snRNP di cui è nota la funzione sono, infatti, componenti fondamentali di un aggregato molecolare sofisticato, chiamato «spliceosoma». Infatti, come tali, prendono parte allo *splicing*, il processo di scissione e saldatura dell'RNA messaggero (m-RNA), un composto intermedio essenziale per mezzo del quale le istruzioni contenute nel codice genetico raggiungono il resto della cellula.

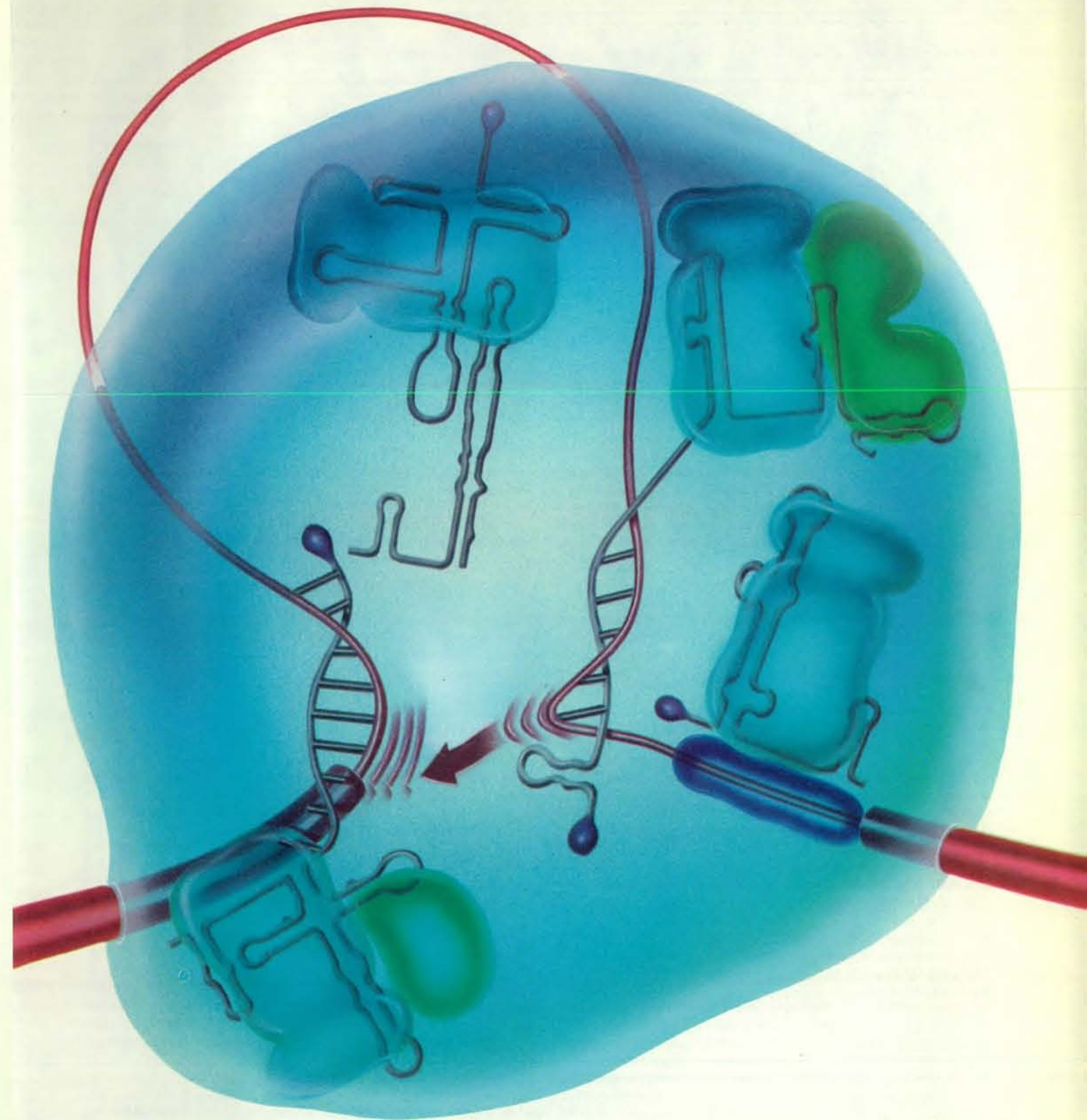
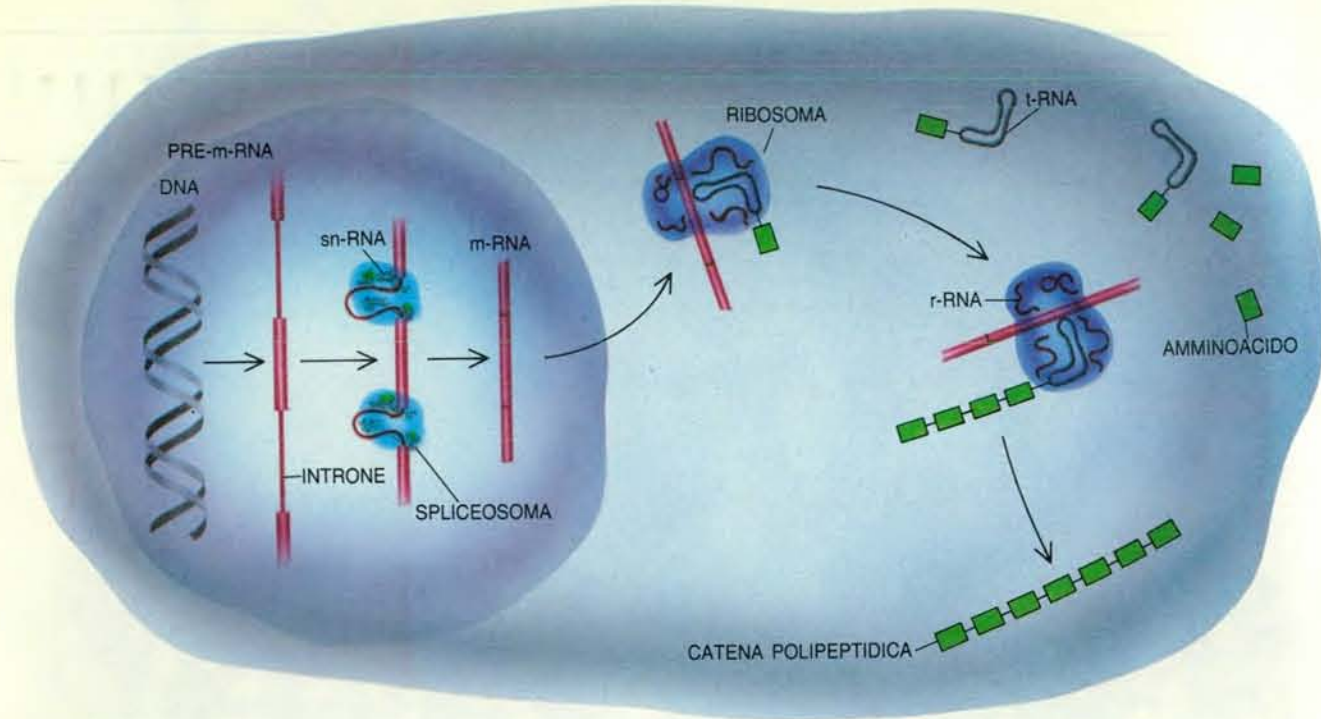
L'operazione di scissione e saldatura dell'm-RNA è delicata e deve essere effettuata con la massima affidabilità e precisione. Non deve quindi sorprendere che le piccole ribonucleoproteine nucleari negli spliceosomi siano specializzate: ciascuna esegue un compito diverso durante l'operazione stessa. L'immagine delle snRNP che lavorano di concerto nello spliceosoma richiama quella di un meccanismo ben oliato.

Il significato funzionale delle piccole ribonucleoproteine nucleari può essere apprezzato meglio nel contesto generale dell'espressione genica, il processo mediante il quale l'informazione genetica contenuta nel DNA dirige la sintesi delle proteine. Nelle cellule degli organismi superiori, tale processo ha inizio nel nucleo, dove il filamento codificante della doppia elica di DNA, costituito da subunità chiamate nucleotidi, viene trascritto in un RNA messaggero a filamento singolo. Alla fine, l'm-RNA trascritto viene trasferito nel citoplasma, dove la sua sequenza nucleotidica è tradotta in una sequenza amminoacidica. Le catene di amminoacidi si ripiegano poi per formare le proteine (*si veda l'illustrazione a pagina 28*).

Da molto tempo è noto, in biologia molecolare, che due altri tipi di RNA partecipano all'espressione genica. Come l'm-RNA essi sono trascritti a partire da uno stampo di DNA, ma non specificano proteine: collaborano invece alla traduzione dell'm-RNA. Un tipo, noto come RNA di trasporto, o t-RNA, va alla ricerca di amminoacidi e li scorta fino allo stampo dell'm-RNA. L'altro tipo, chiamato RNA ribosomale, o r-RNA, è un importante componente degli organelli cellulari noti come ribosomi. I ribosomi sono complessi stabili di RNA e di proteine che mediano l'interazione tra l'm-RNA, il t-RNA e gli amminoacidi durante la sintesi proteica.

Negli organismi superiori l'espressione genica è complicata dalla presenza del DNA di regioni non codificanti, gli introni. Gli introni possono avere una lunghezza variabile tra 65 e 100 000 nucleotidi e un singolo gene ne può contenere fino a 50. Poiché le sequenze di DNA sono trascritte in blocco, senza discriminazione tra introni ed esoni (regioni codificanti), l'RNA trascritto primario è disseminato di segmenti che non hanno significato genetico. Se la sintesi proteica cominciasse a partire da un simile frammento di «pre-RNA messaggero», fallirebbe nel momento in cui incontrasse un introne. Pertanto, prima che gli m-RNA trascritti primari siano trasferiti nel citoplasma, è necessario che gli introni vengano rimossi e che gli esoni siano ricongiunti nella stessa successione con cui erano presenti nel DNA.

È proprio questa fondamentale operazione di scissione e saldatura che viene mediata dalle piccole ribonucleoproteine nucleari. La loro partecipazione alla trasformazione (maturazione) dell'm-RNA è stata stabilita diversi anni fa ma solo ora si sta chiarendo il loro meccanismo d'azione. Quando, nel 1970, sono entrata a far parte della Yale University, il termine introne non era ancora stato coniato e sulla trasformazione dell'm-RNA nel nucleo si avanzavano solo congetture. All'inizio, la mia ricerca si concentrò sulla struttura e sulla funzione delle molecole di RNA nelle cellule batteriche, ma verso la metà degli anni settanta, mentre trascorrevo l'anno sabbatico nel laboratorio di Klaus Weber al Max Planck Institut für Biophysikalische Chemie di Göttingen, decisi di studiare l'RNA delle cellule di mammifero.

A quell'epoca il comportamento dell'm-RNA nelle cellule degli organismi superiori sembrava misterioso. Esperimenti compiuti in molti laboratori avevano scoperto il fatto enigmatico che solo una piccola frazione dell'RNA trascritto nel nucleo viene trasferito nel citoplasma. Gran parte di esso, invece, è degradata entro pochi minuti dalla sintesi. Inoltre, nel 1968, O. P. Samarina, G. P. Georgiev e collaboratori dell'Accademia delle Scienze di Mosca avevano descritto filamenti insolitamente lunghi

In uno «spliceosoma» le quattro piccole ribonucleoproteine nucleari più importanti (snRNP o, alla maniera inglese, «snurp») cooperano nel tagliare un segmento non codificante, detto introne, da un precursore dell'RNA messaggero (*in rosso*). Qui le ribonucleoproteine prendono parte alla prima fase del processo di scissione e saldatura, in cui le due estremità dell'introne vengono avvicinate. Le snRNP interagiscono direttamente con l'RNA messaggero mediante la formazione di legami chimici (che in figura sono rappresentati come pioli di una scala), o indirettamente attraverso intermediari proteici, come la proteina indicata in viola a destra.

L'espressione genica comporta la partecipazione di quattro tipi di RNA. In un primo tempo un precursore dell'RNA messaggero (m-RNA) viene trascritto a partire dal DNA; questo pre-RNA messaggero contiene introni sui quali si riuniscono gli spliceosomi. Questi ultimi, costituiti in parte da piccole molecole di RNA nucleari (snRNA), tagliano gli introni e l'RNA messaggero può allora migrare nel citoplasma. Qui un ribosoma, contenente r-RNA, traduce l'm-RNA in una proteina. Gli RNA di trasporto, o t-RNA, riuniscono gli amminoacidi in modo da costruire una catena polipeptidica, e quindi una proteina, la quale alla fine viene rilasciata.

di RNA, punteggiati di proteine, che ricordavano un filo di perle. Si sapeva che quelle perle fatte di proteine, chiamate ribonucleoproteine nucleari eterogenee (hnRNP, dall'inglese *heterogeneous nuclear ribonucleoprotein*), si formano subito dopo che il precursore dell'm-RNA viene trascritto dal DNA parentale.

Queste ribonucleoproteine nucleari eterogenee costituivano l'oggetto della mia sfortunata ricerca di anticorpi. Pensavo che il legame delle «perle» proteiche potesse in qualche modo essere decisivo nel determinare quali parti del pre-RNA messaggero dovessero essere destinate alla degradazione e quali, invece, dovessero essere trasferite nel citoplasma. Se fossi riuscita a ottenere anticorpi che reagivano con quelle proteine e ne bloccavano la funzione, forse avrei scoperto finalmente in che cosa consistesse questa funzione.

Normalmente, un biologo riesce a produrre gli anticorpi contro un particolare antigene inoculando quest'ultimo (in questo caso le hnRNP) in animali, che reagiscono sintetizzando anticorpi contro l'invasore; questi anticorpi si possono poi estrarre dal siero degli animali inoculati. Per sette mesi iniettai ribonucleoproteine nucleari eterogenee di fegato di ratto in conigli e polli, ma questi animali non reagirono. Evidentemente, il loro sistema immunitario non riconosceva come estranee quelle hnRNP, il che mi fece concludere che esse sono simili nelle varie specie di vertebrati. Tuttavia quando, alla fine del 1977, tornai a Yale non ero ancora riuscita a ottenere anticorpi anti-hnRNP.

Nel frattempo, altri ricercatori avevano compiuto la fondamentale scoperta degli introni e della scissione e saldatura dell'RNA nelle cellule dei mammiferi. Questi fenomeni, riferiti per la prima volta da Phillip A. Sharp e colleghi del Massachusetts Institute of Technology e da Thomas R. Broker, Louise T. Chow e collaboratori del Cold Spring Harbor Laboratory, fornivano una spiegazione della lunghezza dei precursori dell'm-RNA e della notevole quantità di pre-RNA messaggero che viene degradata. Risultò evidente che molti geni sono più introni che esoni e che, durante il processo di scissione e saldatura, i «cappucci» e le «code» (gruppi chimici caratteristici alle estremità di una molecola di RNA) rimangono intatti. Il meccanismo biochimico del processo rimaneva, tuttavia, ancora sconosciuto.

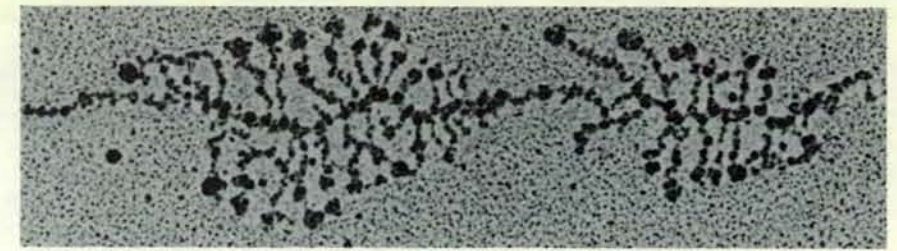
Poco dopo il mio ritorno dalla Germania, notai con Michael R. Lerner un articolo sulla rivista inglese «Nature», nel quale si parlava di anticorpi aberranti, che comparivano nel siero di pazienti affetti da collagenopatia. Questa malattia e le malattie affini, artrite reumatoide e lupus eritematoso, sono note come malattie autoimmuni, perché il sistema immunitario del paziente «impazzisce» e produce anticorpi contro i componenti delle cellule dell'organismo di cui fa parte. Un anticorpo particolarmente abbondante nei pazienti affetti da collagenopatia veniva chiamato anti-RNP. Gli autori di quell'articolo non conoscevano l'esatta natura dell'antigene a cui l'anti-RNP si legava, ma sapevano che era composto di RNA e di proteina e che era localizzato nei nuclei cellulari di molte specie di mammiferi.

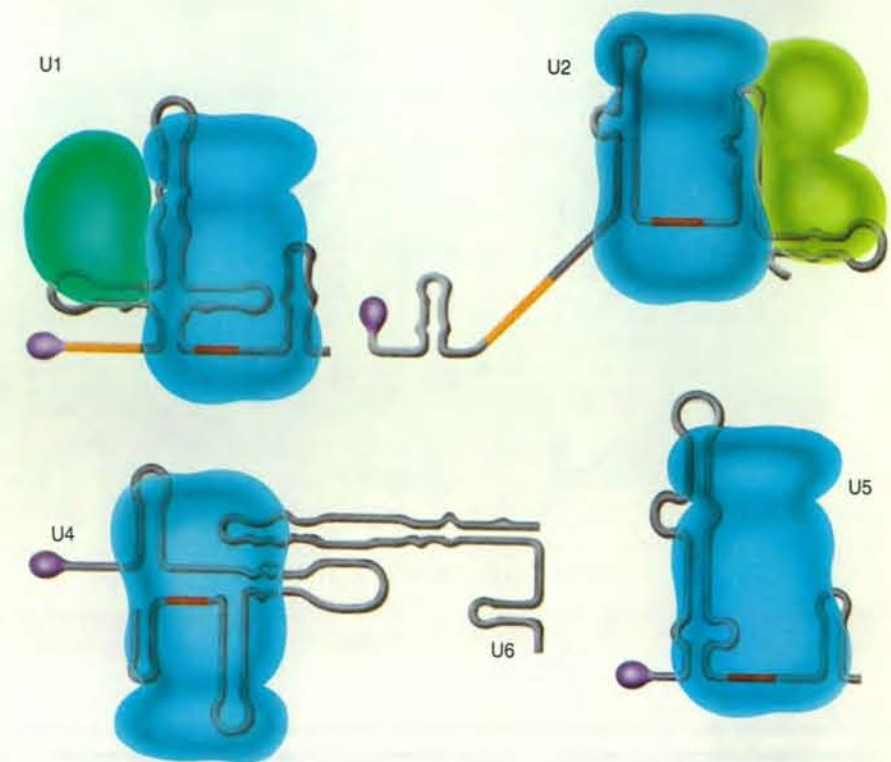
Questo anticorpo, io pensavo, poteva proprio essere quello che avevo cercato di stimolare, senza riuscirvi, contro le ribonucleoproteine nucleari eterogenee. Lerner suggerì subito che ci mettessimo in contatto con il gruppo di reumatologi che lavorava di fronte al nostro laboratorio, per ottenere da loro campioni di sangue adatti. Dopo poche ore John A. Hardin della School of Medicine ci consegnò campioni di siero contenenti anti-RNP e altri contenenti un anticorpo affine, l'anti-Sm.

I nostri primi esperimenti ci indicarono che la nostra ipotesi di partenza era in realtà sbagliata. Né l'anti-RNP né l'anti-Sm reagivano con le ribonucleoproteine nucleari eterogenee. Al contrario, gli anticorpi si legavano a componenti nucleari più piccoli, che apparivano abbondanti e diffusi nelle cellule dei mammiferi. Avremmo potuto considerare quell'ultimo gruppo di anticorpi come un altro vicolo cieco, ma dato che i complessi RNA-proteina stavano cominciando proprio allora a dimostrarsi implicati nel processo di trasformazione dell'RNA nei batteri, decidemmo di compiere un sondaggio sull'identità molecolare degli antigeni.

Impiegammo più di un anno, effettuando un numero incalcolabile di esperimenti scoraggianti, per isolare le molecole bersaglio degli anti-RNP e degli anti-Sm. Infine riuscimmo nel nostro intento utilizzando colture di cellule umane il cui RNA era marcato con traccianti radioattivi. Da tali cellule si possono estrarre gli antigeni con tecniche standard di immunoprecipitazione. In primo luogo le cellule vengono rotte e viene aggiunta una piccola quantità di siero del paziente. Gli anticorpi presenti in esso si legano alle molecole bersaglio contenute nell'estratto cellulare; i complessi antigene-anticorpo così ottenuti sono fatti precipitare selettivamente mediante aggiunta di speciali preparati di pareti di cellule batteriche, che si combinano con gli anticorpi. Marcato con un isotopo radioattivo, l'RNA presente nei precipitati può allora essere isolato e classificato in base alle dimensioni. Quindi, anche se gli anticorpi si legano in realtà alle proteine nelle particelle precipitate, queste finiscono per essere identificate grazie al loro RNA. Le particelle isolate con questo procedimento sono, naturalmente, quelle che oggi chiamiamo piccole ribonucleoproteine nucleari o snRNP.

Con questo metodo Lerner e io abbiamo trovato cinque comuni specie di RNA delle piccole ribonucleoproteine nucleari, che abbiamo chiamato U1, U2, U4, U5 e U6 (U significa uracile, un importante costituente chimico di quell'RNA). Le particelle U4, U5 e U6 non erano mai state descritte prima, mentre U1 e U2 erano già state caratterizzate e le loro sequenze dedotte grazie a indagini condotte nel laboratorio di Harris Busch al Baylor College of Medicine, agli inizi degli anni settanta. In verità, ancora prima di far precipitare l'U1, avevamo esaminato la sequenza pubblicata da Busch e ci eravamo resi conto che l'RNA adiacente al cappuccio poteva appaiarsi con l'RNA vicino ai siti degli introni dove avveniva il processo di scissione e saldatura. Questi stessi siti hanno «sequenze di consenso»: corte sequenze di nucleotidi comuni a molti introni.

John Rogers e Randolph Wall dell'Università della California a Los Angeles avevano anch'essi notato la sorprendente complementarità tra i siti dove avviene la scissione e la saldatura e la sequenza U1 e proposero, indipendentemente da noi, che quella sequenza fosse responsabile dell'allineamento delle due estremità di un introne durante la saldatura. Sappiamo oggi che questa ipotesi era troppo semplicistica, ma che comunque non era lontana dal vero.

Gli spliceosomi in azione assomigliano a tanti grossi punti scuri sui filamenti di m-RNA che si estendono al di sopra e al di sotto del DNA, disposto orizzontalmente. I punti più piccoli sono le particelle di ribonucleoproteine nucleari eterogenee (hnRNP), che hanno stimolato l'autrice a intraprendere le ricerche descritte nell'articolo. La microfotografia elettronica è di Yvonne N. Osheim della School of Medicine dell'Università della Virginia.

La prova diretta della partecipazione delle piccole particelle ribonucleoproteiche nucleari U1 al processo di scissione e saldatura fu condizionata dalla preparazione di estratti cellulari che potessero realizzare quell'operazione in provetta. Negli anni immediatamente successivi questa venne effettuata solo lentamente, in primo luogo nei laboratori diretti da Walter Keller al Centro di ricerche sul cancro di Heidelberg, in Germania Federale, da Sharp al MIT, da Tom Maniatis alla Harvard University e da John N. Abelson al California Institute of Technology. Nel frattempo, abbiamo trovato che le piccole ribonucleoproteine nucleari U1 e U2 contengono ciascuna almeno sette proteine diverse, alcune delle quali sono esclusive di un tipo di particella mentre altre sono comuni a tutte. Carl Hashimoto, uno dei miei laureandi, e il gruppo di Reinhard Lührmann del Max Planck Institut für Molekular Genetik a Berlino si sono accorti in seguito che U4 e U6 si trovano generalmente assieme nella stessa particella di snRNP.

Quattro tipi di piccole ribonucleoproteine nucleari (snRNP) e cinque specie di RNA nucleari loro associati (snRNA) sono interessati nel processo di scissione e saldatura dell'RNA messaggero. Gli snRNA (*in grigio*) sono noti come U1, U2, U4, U5 e U6. Le particelle U4 e U6 sono abbinate e costituiscono un'unica snRNP. U6 è l'unica particella priva della caratteristica struttura a cappuccio (*in viola*). Le snRNP hanno in comune un complesso di proteine (*in blu*); altre proteine caratteristiche (*in verde*) si associano a U1 e U2. I siti di legame per le proteine comuni sono indicati in arancione e quelli per l'm-RNA in giallo.

Le altre snRNP contengono invece solo un tipo di RNA. Così, le cinque specie di RNA delle snRNP sono presenti in solo quattro tipi di esse.

Con le snRNP purificate per queste analisi, un altro laureando, Stephen M. Mount, ha realizzato il primo esperimento di «protezione» delle snRNP (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Esperimenti del genere sono progettati per evidenziare le regioni del pre-RNA messaggero (se ve ne sono) alle quali si lega una snRNP. Il procedimento è lineare: una soluzione di pre-RNA messaggero, che funge da substrato, viene combinata con una soluzione di snRNP alla quale sono aggiunti anticorpi che fanno da marcatori, quindi si mescola alla soluzione un enzima che degrada l'm-RNA non legato. La regione dell'm-RNA a cui si è legata la snRNP è protetta dalla degradazione e può quindi essere isolata per definirne la sequenza. La localizzazione del segmento protetto sul pre-RNA messaggero può essere determinata confrontando la sua sequenza nucleotidica con quella del pre-RNA messaggero.

Mount ha costruito un modello del pre-RNA messaggero che funge da substrato, dotandolo di un introne e di due esoni adiacenti; ha poi aggiunto piccole ribonucleoproteine nucleari della classe U1. Queste particelle U1 si sono legate, proteggendola, a una sequenza di circa 17 nucleotidi, localizzata nell'introne in corrispondenza del sito di scissione e saldatura che si trova a monte (cioè più vicino al cappuccio del filamento di m-RNA che alla coda). Esse non si sono legate, invece, al sito a valle e non hanno tagliato o saldato il pre-RNA messaggero. Le snRNP perdevano la loro specificità e non si legavano in maniera efficiente se non erano intatte.

Le osservazioni di Mount sono state verificate in esperimenti decisivi quando, nel 1983, sono stati disponibili estratti per effettuare il processo di scissione e saldatura. Collaborando con il gruppo di Sharp al MIT, abbiamo visto che anticorpi specifici per snRNP della classe U1 inibivano la reazione di scissione e saldatura *in vitro*. Keller e Angela Krämer, in collaborazione con il gruppo di Lührmann, hanno «decapitato» l'RNA U1, abolendo quindi il processo di scissione e saldatura. Si è osservato senza ombra di dubbio che le particelle U1 si impegnano nel processo di scissione e saldatura legandosi all'estremità a monte dell'introne e che la regione dell'RNA U1 vicina al cappuccio è essenziale al processo. In seguito, esperimenti di genetica effettuati dal mio collaboratore Alan M. Weiner con Yuan Zhuang, un suo laureando, avrebbero confermato la nostra ipotesi iniziale che i nucleotidi vicino al cappuccio della particella U1 si appaiano con i nucleotidi dei siti di scissione e saldatura degli introni situati a monte.

Uno alla volta, siamo riusciti a chiarire il ruolo delle altre piccole ribonucleoproteine nucleari. Nel 1984, la comprensione della funzione di strutture intermedie di m-RNA nel processo di scissione e saldatura ha suggerito l'esistenza di un altro sito a cui potrebbe legarsi una particella di snRNP. Gli studi hanno rivelato che l'operazione di scissione e saldatura si svolge in due fasi (*si veda l'illustrazione a pagina 32*). Nella prima fase, il sito specifico a monte viene scisso e accoppiato a un nucleotide che si trova vicino al sito a valle, dimodoché l'introne finisce per somigliare a un laccio. A questo punto i due esoni vengono congiunti e l'introne viene liberato in questa forma, per essere poi degradato.

Il punto di biforcazione dell'introne, cioè il punto in cui l'estremità a monte dell'introne si attacca formando il laccio, sembrava un probabile sito di riconoscimento per una snRNP. Un mio laureando, Benoit Chabot, ha svolto esperimenti di protezione con anticorpi di un paziente affetto da una malattia rara; gli anticorpi erano specifici per le snRNP della classe U2 e Chabot ha trovato che le particelle U2 si legano a un segmento di introne lungo 40 nucleotidi, corrispondente al punto di biforcazione. Il nostro presentimento era giusto: il punto è un sito di legame per piccole ribonucleoproteine nucleari e in particolare per la particella U2. Nel contempo, Douglas L. Black nel mio laboratorio e Adrian R. Krainer e Maniatis a Harvard hanno dimostrato che snRNP U2 integre sono necessarie per far avvenire il processo di scissione e saldatura in provetta.

Chabot ha effettuato anche esperimenti di protezione che hanno permesso di identificare la snRNP U5 come la particella che si lega al sito di scissione e saldatura posto a valle. Il legame, che interessa una regione lunga circa 15 nucleotidi, è probabilmente mediato da una proteina. Di recente Black, assieme a Susan M. Berget e a Barbara L. Robberson del Baylor College of Medicine, ha trovato che, distruggendo le particelle U4 e U6 negli estratti, l'attività di scissione e saldatura viene smorzata. Pertanto, anche le particelle U4 e U6 devono essere necessarie per il processo, ma finora non si è potuto stabilire se esse interagiscano con il filamento di pre-RNA messaggero oppure con altre snRNP durante la reazione stessa.

Gli esperimenti di protezione mettono in evidenza i segmenti dell'RNA messaggero (m-RNA) ai quali si lega una piccola ribonucleoproteina nucleare (snRNP). In primo luogo, un pre-RNA messaggero viene aggiunto a un estratto per consentire il processo di scissione e saldatura (*1*), estratto consistente in un cocktail di elementi che sono necessari per poter effettuare questo processo in provetta. Le snRNP presenti nell'estratto si legano al pre-RNA messaggero (*2*). In seguito vengono aggiunti anticorpi che si attaccano a una particolare snRNP (*3*). La maggior parte dell'm-RNA viene distrutta da un enzima che degrada l'RNA messaggero non legato (*4*), mentre l'm-RNA legato a una snRNP rimane intatto e può essere recuperato mediante precipitazione dell'anticorpo. Con questi esperimenti è stato possibile identificare i siti di legame per U1 a monte e per U2 e U5 a valle (*5*).

Le lunghezze delle regioni di legame che abbiamo identificato concordano bene con il limite dimensionale inferiore osservato per gli introni naturali. Queste osservazioni, oltre agli esperimenti in cui sono stati eliminati segmenti di introni, fissano la lunghezza funzionale minima di un introne a circa 65 nucleotidi. Questa cifra corrisponde grosso modo alla somma delle dimensioni dei segmenti di introne a cui si legano le particelle U1, U2 e U5 negli esperimenti di protezione. Sembra così che la geometria del legame con la particella snRNP imponga la lunghezza minima dell'introne.

Altre osservazioni hanno dimostrato la fondatezza del modello che si veniva delineando per il legame delle piccole ribonucleoproteine nucleari. Le ipotetiche interazioni RNA-RNA in corrispondenza dei siti di legame delle U1 e delle U2 sono state confermate in recenti esperimenti di genetica, in cui sono state manipolate le sequenze nucleotidiche sia dell'RNA delle piccole ribonucleoproteine nucleari sia del pre-RNA messaggero. Benché alcuni studi abbiano preso in considerazione lieviti anziché cellule di mammifero, l'estrapolazione sembra giustificabile. Non altrettanto nota è, invece, l'interazione proteina-RNA, che interviene nel riconoscimento del sito per il processo di scissione e saldatura posto a valle. Rimane anche da vedere quanti contatti delle snRNP siano interazioni RNA-RNA e quanti, invece, agiscano tramite le proteine.

Mentre stavamo raccogliendo prove sulla partecipazione delle snRNP al processo di scissione e saldatura, altri dati hanno indicato che i complessi attivi in questo processo sono, in verità, molto grossi. Si è visto che le snRNP e il loro substrato, costituito da pre-RNA messaggero, rappresentano probabilmente non più di un terzo o al massimo la metà della massa di uno spliceosoma. Il resto della massa può essere costituito da fattori proteici, necessari per montare e smontare il complesso dello spliceosoma. Vi sono prove che alcune di queste proteine siano le stesse presenti nelle particelle di ribonucleoproteine nucleari eterogenee che hanno provocato le nostre indagini iniziali sulle snRNP.

Ancora oggi sappiamo poco su queste particelle, ma gli spliceosomi appaiono

Una struttura a laccio si forma durante la scissione di un introne e la saldatura di due esoni. Il processo di scissione e saldatura avviene in due stadi mediati dalle snRNP, piccole ribonucleoproteine nucleari qui non illustrate. Nella prima fase il sito per il processo di scissione e saldatura a monte è tagliato e attaccato al sito di legame di U2, formando la struttura a laccio dell'introne. Nella seconda fase, gli esoni sono congiunti e l'introne è liberato.

un po' meno misteriosi. La loro dimensione risolve almeno un quesito riguardante il processo di scissione e saldatura del pre-RNA messaggero: cioè spiega come fa una cellula a «capire» quando l'RNA messaggero è pronto per essere trasferito nel citoplasma. I filamenti di RNA messaggero che contengono molti introni sono trattenuti nel nucleo fino a quando l'ultimo introne non sia stato rimosso. I complessi spliceosomici hanno dimensioni sufficienti a impedire la fuoriuscita di un m-RNA trascritto attraverso i pori nucleari e non si disaggregano finché il processo di scissione e saldatura non è completo. La presenza anche di un solo spliceosoma su un filamento di m-RNA potrebbe quindi evitare che il filamento sfugga prematuramente.

Uno degli aspetti più interessanti della funzione di uno spliceosoma è che l'intero complesso, anziché un componente singolo, sembra essere responsabile della catalisi della reazione di scissione e saldatura. Pertanto un danno apportato a una qualsiasi delle quattro snRNP note rende inefficiente la reazione, ma nessuna delle snRNP può eseguirla da sola. Può darsi che le snRNP e altri componenti dello spliceosoma cooperino nel disporre l'introne in una configurazione che incoraggi un processo di autoscissione e saldatura. In alcuni organismi, il precursore dell'RNA messaggero forma strutture a laccio e, in effetti, si scinde e si salda da sé senza l'intervento di fattori proteici o di altri RNA. Può darsi che gli spliceosomi forniscano semplicemente le sequenze di introni mancanti necessarie per effettuare il corretto allineamento in questa attività spontanea di scissione e saldatura.

Molte domande sulla funzione degli spliceosomi esigono ancora una risposta. Il processo di scissione e saldatura è soggetto a regolazione: lo stesso pre-RNA messaggero può essere tagliato e ricongiunto in modi diversi in differenti stadi di sviluppo o in tessuti diversi. Ancora non si sa se (o come) le snRNP o altri fattori dello spliceosoma possano mediare una simile regolazione. Non sono stati chiariti fino a questo momento né la via seguita nell'assemblaggio dello spliceosoma né il numero totale di componenti coinvolti. Non è stato ancora identificato il fattore che trattiene l'esone a monte fino a quando esso non si unisce con il suo partner situato a valle; né è stato identificato il meccanismo che assicura la fedeltà del processo di scissione e saldatura. L'attività dello spliceosoma potrebbe comprendere anche alcune fasi di «correzione di bozze»?

Questa breve rassegna sulle piccole ribonucleoproteine nucleari si è limitata alle quattro particelle più abbondanti e alle cinque specie di RNA correlate. Recentemente sono state identificate nei nuclei di cellule di mammifero almeno altre 10 snRNP. Queste particelle non sono dominanti come quelle degli spliceosomi. Nel mio laboratorio Kimberly L. Mowry ha dimostrato che una di esse, una particella contenente RNA di tipo U7, è interessata nella trasformazione dell'estremità a valle di una sottoclasse di m-RNA trascritti. È probabile che le altre snRNP meno abbondanti prendano parte anch'esse alla trasformazione dell'RNA messaggero.

È importante ripetere che tutte le snRNP che abbiamo studiato finora sono state isolate facendo uso di anticorpi di persone affette da malattie reumatiche; quindi i nostri esperimenti, in apparenza speculativi, contribuiscono alla comprensione e alla cura di queste malattie. Inoltre, le snRNP non sono le sole piccole ribonucleoproteine. Analoghi complessi proteina-RNA sono stati identificati nel citoplasma e in una regione nucleare, il nucleolo. Queste particelle sono chiamate rispettivamente piccole ribonucleoproteine citoplasmatiche o scRNP («scyrp», dall'inglese *small cytoplasmic ribonucleoprotein*) e piccole ribonucleoproteine nucleolari o snoRNP («snorp», dall'inglese *small nucleolar ribonucleoprotein*). Benché molte di esse siano state caratterizzate strutturalmente, solo la funzione di una è stata stabilita. Considerando la relativa varietà delle snRNP e delle altre piccole ribonucleoproteine, possiamo prevedere che la ricerca futura svelerà una diversità di ruoli ancora superiore per queste particelle individuate nelle cellule viventi.

BIBLIOGRAFIA

PADGETT RICHARD A., GRABOWSKI PAULA J., KONARSKA MARIA M., SEILER SHARON e SHARP PHILLIP A., *Splicing of Messenger RNA Precursors* in «Annual Review of Biochemistry», pp. 1119-1150, 1986.

MANIATIS TOM e REED ROBIN, *The Role of Small Nuclear Ribonucleoprotein Particles in Pre-mRNA Splicing* in «Nature», 325, n. 6106, 19 febbraio 1987.

MOWRY KIMBERLY L. e STEITZ JOAN A., *Identification of the Human U7 snRNP as One of Several Factors Involved in the 3' End Maturation of Histone Premessenger RNA's* in «Science», 238, n. 4834, 18 dicembre 1987.

BIRNSTIEL M. L. (a cura), *Small Nuclear Ribonucleoprotein Particles: Structure and Function*, Springer-Verlag, 1988.

Gli acceleratori di particelle verificano la teoria cosmologica

Esiste un limite al numero di famiglie di particelle elementari? Gli acceleratori di particelle saranno fra breve in grado di rispondere a questa domanda, sorta dallo studio dei prodotti della nucleosintesi primordiale

di David N. Schramm e Gary Steigman

Negli ultimi anni la cosmologia e la fisica delle particelle elementari si sono unite in un matrimonio reciprocamente vantaggioso che ha prodotto diversi risultati assai interessanti. Tali risultati cominciano a fornire elementi sull'origine dello spazio-tempo e della materia in un momento che si colloca tra 10^{-43} e 10^{-35} secondi dopo la nascita dell'universo nell'esplosione primordiale nota come big bang. Importanti chiarimenti sulla natura dello stesso big bang si potranno inoltre avere da una teoria, attualmente in fase di messa a punto, che costituirebbe la definitiva «teoria del tutto»; essa dovrebbe descrivere tutte le interazioni tra le particelle fondamentali in un'unica audace sintesi.

La confluenza di cosmologia e fisica delle particelle sta perfino cambiando il modo in cui si fa scienza. Per tradizione l'astronomia è una scienza osservativa anziché sperimentale, fatta cioè di osservazioni passive con i telescopi e pressoché ignara di sperimentazione attiva. D'altra parte, gli strumenti tradizionali della fisica delle particelle sono sempre stati gli acceleratori ad alte energie. Ora che la cosmologia ha iniziato ad avanzare ipotesi nell'ambito della fisica delle particelle elementari, è presumibile che le sue previsioni possano essere verificate con una serie di esperimenti accuratamente controllati condotti con gli acceleratori. Sono occorsi più di 10 anni perché gli acceleratori raggiungessero energie sufficienti per eseguire gli opportuni esperimenti, ma ora la sperimentazione è in pieno svolgimento e i risultati preliminari confermano le previsioni cosmologiche.

La cosmologia ha iniziato perciò ad assumere il carattere di vera scienza, nel senso che le idee che nel suo ambito hanno origine non vengono più semplicemente formulate, ma possono essere sottoposte a verifiche sperimentali su una scala di tempi molto inferiore alla durata della vita di uno scienziato. È una bella differenza rispetto a qualche tempo fa, quando le teorie cosmologiche proliferavano e la loro attrattiva estetica era in pratica l'unico criterio per accettarle o respingerle. Invece oggi si possono impiegare i telescopi per verificare concetti della fisica fondamentale, come quelli che vengono proposti per la formulazione della «teoria del tutto». In realtà, le verifiche di teorie che riguardano interazioni di particelle di energie elevatissime potrebbero avvenire in un solo laboratorio: il big bang stesso.

Tra i più entusiasmanti frutti del matrimonio tra cosmologia e fisica delle particelle vi è la questione del «primogenito». L'universo non sarebbe lo stesso se esistessero troppi tipi differenti di particelle elementari; in altre parole, dalla cosmologia si deduce che il numero di particelle fondamentali deve essere piccolo. Questa particolare previsione è emersa dalla nostra analisi delle reazioni nucleari avvenute quando l'universo aveva circa un secondo di vita; analisi nella quale abbiamo compiuto l'audace passo di trasformare grandezze cosmologiche (come la densità media di energia) in grandezze che interessano la fisica delle particelle (come il numero di particelle fondamentali).

La nostra previsione resta significativa, ma fu particolarmente efficace quando venne avanzata perché allora la convinzione più diffusa era che ogni volta che un acceleratore riusciva a raggiungere energie più elevate si sarebbero dovute scoprire nuove particelle. Le teorie della fisica delle particelle non avevano posto alcun limite significativo al numero possibile di tipi di particelle fondamentali e sembrava che tale numero potesse essere infinito. La previsione teorica da noi avanzata sulla base di considerazioni cosmologiche contraddiceva dunque questa deduzione empirica. Tale previsione ha resistito al passare del tempo e oggi appare ancora più convincente: il numero delle particelle fondamentali deve essere limitato, altrimenti l'universo sarebbe diverso da come lo conosciamo.

Per spiegare in che modo le considerazioni cosmologiche pongano un limite al numero di tipi di particelle elementari, dobbiamo prima ricordare brevemente alcuni concetti di fisica delle particelle. Nell'ultimo mezzo secolo gli esperimenti eseguiti con gli acceleratori di particelle hanno permesso di stabilire che le particelle fondamentali si possono dividere in due grandi classi, i fermioni e i bosoni (dai nomi del fisico italiano Enrico Fermi e del fisico indiano Satyendranath N. Bose). I fermioni sono le particelle che costituiscono la materia, mentre i bosoni sono i portatori delle forze agenti tra le particelle. I fermioni si dividono a loro volta in due sottoclassi: quark e leptoni. Il vocabolo «quark» deriva da uno strano verso di *Finnegans Wake* di James Joyce, «Three quarks for Muster Mark!», mentre «leptone» deriva dal greco *leptos*, che significa piccolo. I quark sono i costituenti dei neutroni, dei protoni e di altre particelle a essi correlate, tutte comprese nella famiglia degli adroni. I leptoni dotati di carica elettrica possono subire interazioni, come l'elettrone, che orbita attorno al nucleo atomico; viceversa i neutrini, leptoni privi di carica, possono attraversare anche tutta la Terra senza subire alcuna interazione. A ogni particella corrisponde un'antiparticella dotata della stessa massa e vita media, ma con proprietà elettriche opposte.

Le interazioni tra le varie particelle sono regolate da quattro forze fondamentali, ciascuna delle quali ha come portatore un diverso bosone o gruppo di bosoni. Il fotone, o quanto di luce, è il portatore della forza elettromagnetica, che agisce tra cariche elettriche; il gravitone media la forza gravitazionale, che agisce tra masse; otto gluoni mediano la forza nucleare forte, che agisce tra i quark, mentre i bosoni vettori intermedi sono i portatori della forza nucleare debole, che è responsabile di alcuni tipi di decadimento nucleare. Attualmente sembra che tutte le interazioni dell'universo si possano ridurre a combinazioni di queste quattro interazioni.

Uno dei risultati più importanti della fisica del XX secolo è stata la dimostrazione che a energie (corrispondenti a temperature) molto elevate le quattro forze cominciano a unificarsi. In particolare, alcuni esperimenti condotti al Laboratorio europeo per la fisica delle particelle del CERN hanno dimostrato che le forze debole ed elettromagnetica si fondono in una sola forza elettrodebole a energie superiori a 100 miliardi di elettronvolt (100 GeV); tale energia corrisponde alla temperatura dell'universo a circa 10^{-10} secondi dal big bang. Le scoperte compiute al CERN fanno sperare che la forza forte si fonda con la forza elettrodebole a circa 10^{15} GeV in una «teoria di grande unificazione» e che a circa 10^{19} GeV anche la forza di gravità si unisca alle altre così da essere compresa in una «teoria del tutto».

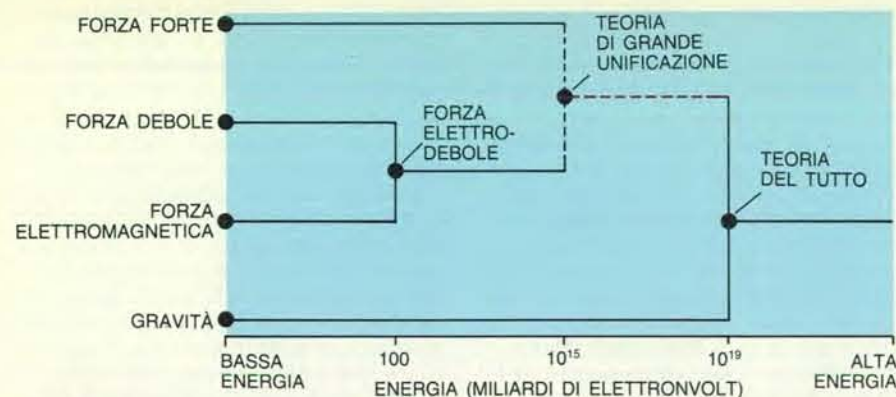
Le energie necessarie per verificare le teorie di unificazione proposte sono di gran lunga superiori a quelle accessibili agli acceleratori di particelle esistenti. Il più grande acceleratore del mondo, il Tevatron del Fermi National Accelerator Laboratory, ha una circonferenza di quattro chilometri e sta per arrivare a energie di due bilioni di elettronvolt (2000 GeV). Un acceleratore dello stesso tipo del Tevatron ma in grado di raggiungere le energie necessarie per verificare una teoria di grande unificazione, dovrebbe estendersi fino alle stelle più vicine, mentre una macchina adatta alla verifica di una «teoria del tutto» arriverebbe al centro della Galassia. Entrambe le macchine sono ovviamente al di là delle più ottimistiche previsioni di realizzazioni scientifiche. Questo semplice fatto è stato uno dei motivi che hanno suggerito di utilizzare le osservazioni cosmologiche per verificare le previsioni della fisica delle particelle.

Il flusso di informazioni ha cominciato a scorrere anche in senso inverso; gli acceleratori di particelle vengono utilizzati per verificare una previsione cosmologica: l'esistenza di un limite al numero di particelle fondamentali della materia.

Sembra che esistano 12 particelle fondamentali, con le relative antiparticelle. Sei di esse sono quark, che portano i bizzarri nomi «su» (*up*), «giù» (*down*), «incantato» (*charm*), «strano» (*strange*), «alto» (*top*) o «verità» (*truth*) e «basso» (*bottom*) o «bellezza» (*beauty*). Tutti i quark sono stati rilevati, tranne il quark alto, sebbene le argomentazioni teoriche a favore della sua esistenza siano forti. Le altre sei particelle fondamentali sono leptoni: l'elettrone, il muone, la particella tau e i tre neutrini loro associati, il neutrino elettronico, il neutrino muonico e il neutrino tauonico.

Le 12 particelle vengono raggruppate in tre famiglie, ciascuna composta di quattro membri. La prima famiglia comprende i quark su e giù, l'elettrone e il neutrino elettronico; la seconda i quark incantato e strano, il muone e il neutrino muonico, mentre la terza raggruppa i quark alto e basso, la particella tau e il neutrino tauonico. Tutta la materia comune è data da membri della prima famiglia. Per esempio, il protone è composto da due quark su, ognuno avente carica pari a 2/3 della carica elettrica positiva unitaria, e da un quark giù, con carica di 1/3 della carica negativa unitaria. Il neutrone è formato da due quark giù e da un quark su. Ogni atomo è semplicemente un duro «nocciolo» di protoni e neutroni strettamente legati, circondato da una nube di elettroni.

Dal momento che tutta la materia comune è fatta di membri della prima famiglia, uno dei più grandi misteri che oggi si presentano alla fisica delle particelle è perché esistano le altre famiglie e quante ve ne siano. Come disse I. I. Rabi quando venne scoperto il muone, «Chi l'ha chiesto?». Basandoci sulla tendenza a trovare un sempre maggior numero di

I costituenti fondamentali della materia, i quark e i leptoni, sono raggruppati in famiglie che comprendono due tipi di particelle di ciascuna classe. Le particelle si possono distinguere, fra le altre proprietà, per la loro carica elettrica. Attualmente si conoscono tre famiglie, formate dai 12 quark e leptoni noti. Tutta la materia comune è composta da membri della prima famiglia (il protone, per esempio, è formato da due quark su e un quark giù). Le teorie di fisica delle particelle non prevedono il possibile numero di famiglie esistenti: in linea di principio esso potrebbe essere infinito. Basandosi sulle teorie cosmologiche, d'altro canto, è stato ricavato un limite massimo di quattro famiglie. Una verifica di tale limite è attualmente in corso presso diversi acceleratori di particelle.

Tutte le interazioni note fra particelle elementari possono essere descritte dalle quattro forze della natura. La forza forte lega i quark, la forza debole è responsabile di alcuni decadimenti nucleari, la forza elettromagnetica agisce tra le cariche elettriche e la forza di gravità tra le masse. Si ritiene che alle elevatissime energie presenti nell'universo subito dopo il big bang le quattro forze fossero unificate e di fatto è già stata verificata una teoria che unifica le forze debole ed elettromagnetica nella cosiddetta forza elettrodebole. Una «teoria di grande unificazione» dovrebbe unificare tali forze con la forza forte; una «teoria del tutto» dovrebbe descrivere le quattro forze come manifestazioni di una sola forza.

particelle all'aumentare dell'energia degli acceleratori di particelle, potremmo aspettarci che le famiglie continuino a proliferare. In effetti le teorie proposte nell'ambito della grande unificazione hanno detto ben poco sul numero totale di famiglie. Per esempio, il primo modello di teoria di grande unificazione ad avere acquisito una certa popolarità nella seconda metà degli anni settanta, la SU(5) (che sta per «gruppo unitario speciale a cinque gradi di libertà»), può avere un numero di famiglie qualsiasi.

Vi è però un buon motivo per ammettere l'esistenza di almeno tre famiglie. M. Kobayashi del KEK, l'acceleratore di protoni giapponese, e T. Masakawa dell'Università di Tokyo hanno sottolineato che è possibile comprendere meglio l'asimmetria tra materia e antimateria, osservata per la prima volta nel 1964 da Val L. Fitch della Princeton University e James W. Cronin dell'Università di Chicago, se esistono almeno tre famiglie di particelle elementari. L'asimmetria può giustificare l'eccesso di materia rispetto all'antimateria osservato nell'universo e che permette alla materia di esistere (si veda l'articolo *Un difetto nello specchio cosmico* di Robert K. Adair in «Le Scienze» n. 236, aprile 1988). L'esistenza di almeno tre famiglie non è quindi del tutto inutile. Tuttavia ci piacerebbe ugualmente sapere con esattezza quante famiglie di quark e leptoni esistano. Se i quark e i leptoni sono i mattoni fondamentali della natura, vorremmo fare la conoscenza di tutti i suoi componenti. Qualora il numero di famiglie risultasse illimitato, ci si potrebbe chiedere se queste particelle sono davvero fondamentali. Allo stesso modo in cui gli atomi sono formati di protoni, neutroni ed elettroni forse anche i quark e i leptoni sono formati di entità ancora più piccole (si veda l'articolo *La struttura dei quark e dei leptoni* di Haim Harari in «Le Scienze» n. 178, giugno 1983).

È ora chiaro che la cosmologia potrebbe dare una risposta al problema del numero delle famiglie di quark e leptoni: essa indica che tale numero deve essere finito e, in più, limita il possibile intervallo a piccoli valori: devono esistere solo tre o, al massimo, quattro famiglie.

La previsione che il numero di famiglie sia limitato si basa su elementi raccolti osservando ciò che rimane visibile del più grande «esperimento con acceleratori» mai effettuato, il big bang. Il modello del big bang fu proposto originariamente come una delle due teorie cosmologiche antitetiche che dominavano il dibattito scientifico negli anni cinquanta e agli inizi degli anni sessanta; la teoria rivale era quella dello stato stazionario. Entrambe furono messe a punto per spiegare la scoperta dell'espansione dell'universo, fatta da Edwin P. Hubble nel 1929. Il modello del big bang afferma che in origine l'universo era una «palla di fuoco» rovente ed enormemente densa e che espandendosi esso si è raffreddato e rarefatto; secondo la teoria dello stato stazionario, invece, la materia viene creata in continuazione in modo tale che, sebbene l'universo si sia espanso, la sua densità è rimasta costante.

Negli anni sessanta il modello del big bang ha ricevuto numerose conferme sperimentali e all'inizio degli anni settanta era ormai il chiaro vincitore. La più famosa di tali conferme fu la scoperta della radiazione cosmica di fondo da parte di Arno A. Penzias e Robert W. Wilson dei Bell Telephone Laboratories (in seguito insigniti del premio Nobel). Se il modello del big bang è corretto, l'universo primordiale doveva essere così denso e caldo che la materia avrebbe dovuto emettere uno spettro caratteristico di radiazione termica. Secondo la teoria dello stato stazionario, invece, la densità dell'universo è sempre stata uguale all'attuale e perciò non è mai esistito uno stato primordiale denso e rovente: non dovrebbe quindi esistere alcuna radiazione termica. Penzias e Wilson scoprirono un fondo uniforme di radiazione a microonde che si inserisce perfettamente nel modello del big bang.

Il sostegno più forte al modello del big bang è fornito dagli studi sulla nucleosintesi primordiale: la formazione degli elementi. Per formare gran parte degli elementi a partire da protoni e neutroni sono necessarie temperature dell'ordine di 10 miliardi di kelvin (gradi Celsius sopra lo zero assoluto), che avrebbero dovuto registrarsi circa un secondo dopo il big bang. Perciò, misurando le abbondanze relative degli elementi, si può risalire alle condizioni esistenti un secondo dopo l'istante iniziale. Al confronto, la radiazione di fondo a microonde serve per valutare le condizioni dell'universo solo fino a 100 000 anni dopo il big bang, quando i fotoni vennero diffusi per l'ultima volta da materia alla temperatura di circa 3000 kelvin.

Parleremo ora dettagliatamente della nucleosintesi primordiale, dato che questo ci consentirà non solo di chiarire maggiormente il big bang, ma anche di stabilire un collegamento con la fisica delle particelle. Per prima cosa, vale la pena di fare presente che la teoria della nucleosintesi primordiale ha previsto le abbondanze di numerosi elementi leggeri e di loro isotopi, tra i quali elio 3, elio 4, deuterio (l'isotopo pesante dell'idrogeno) e litio 7; le abbondanze previste coprono quasi 10 ordini di grandezza. Le osservazioni sembrano dare conferma a tutte queste previsioni, perfino nei dettagli.

Il notevole accordo riscontrato tra le previsioni teoriche della nucleosintesi primordiale e le abbondanze degli elementi leggeri ricavate dalle osservazioni è fonte di soddisfazione. La teoria e le osservazioni concordano su un valore della densità di protoni e neutroni del tutto coerente con la densità determinata da studi della dinamica della materia luminosa nell'universo. Le previsioni basate sull'evoluzione dell'universo durante i primi 100 secondi successivi al big bang sono in accordo con le osservazioni eseguite circa 10 miliardi di anni più tardi.

Sembra dunque che oggi i fisici dispongano di una conoscenza *quantitativa* del comportamento dell'universo che permette di risalire fino all'epoca della nucleosintesi primordiale. Tale conoscenza dettagliata ha fornito l'impulso necessario per tentare di spingersi fino a epoche precedenti, descrivibili con una teoria unificata.

La forza della teoria della nucleosintesi primordiale è dovuta al fatto che essenzialmente tutti i termini che compaiono nelle relative equazioni sono ben noti per via sperimentale. In particolare, le temperature a cui si pensa sia avvenuta la nucleosintesi corrispondono a energie facilmente raggiungibili con acceleratori di energia relativamente bassa, quali i generatori di Van de Graaff. Ne segue che il comportamento dei nuclei atomici nelle condizioni della nucleosintesi primordiale non è oggetto di ipotesi, essendo conosciuto con esattezza.

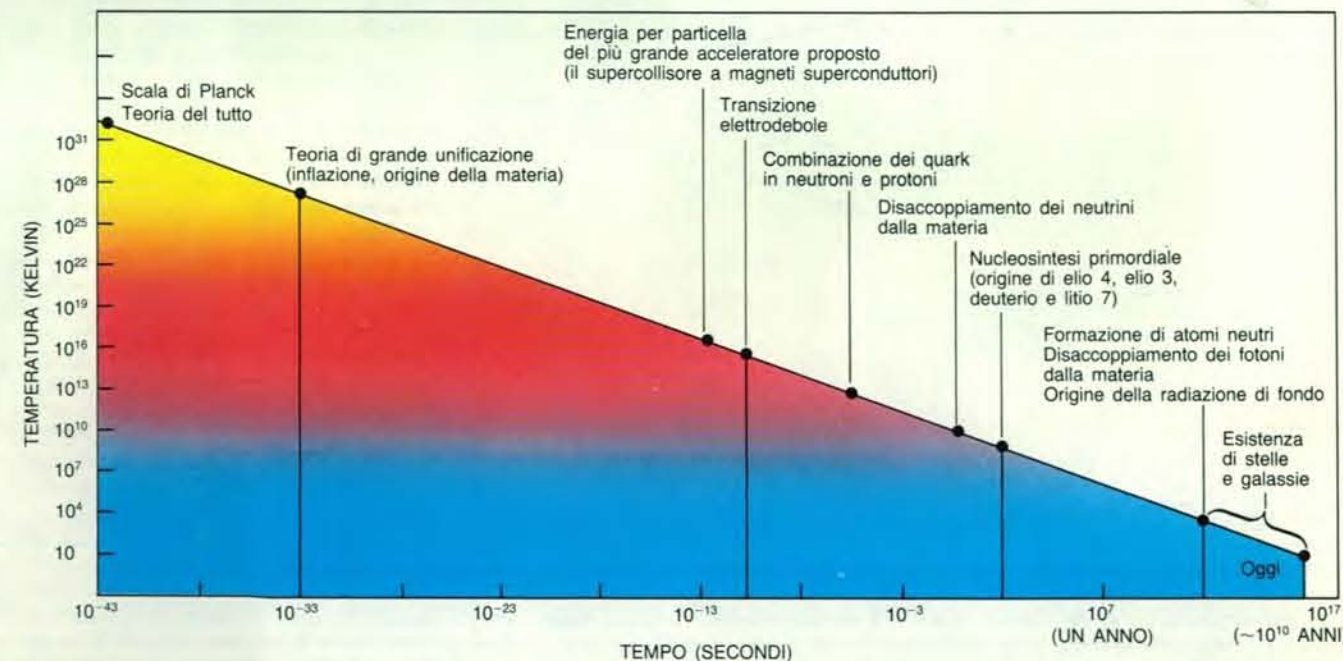
Per calcolare che cosa accade, tutto ciò che si deve fare è seguire l'evoluzione di un gas di nucleoni (ossia composto di neutroni e protoni) in un universo in via di espansione e raffreddamento. A temperature molto maggiori di 10 miliardi di kelvin, che corrispondono al periodo precedente il primo secondo dopo il big bang, i protoni e i neutroni erano in equilibrio e presenti in numero uguale. Tali temperature erano troppo elevate per consentire ai protoni e ai neutroni di fondersi in nuclei complessi. Le collisioni con elettroni e positroni (antielettroni) e con neutrini e antineutrini trasformavano neutroni in protoni e protoni in neutroni a tassi all'incirca uguali. Il neutrone è leggermente più pesante del protone, perciò i neutroni si trasformano in protoni più facilmente di quanto i protoni si trasformino in neutroni. A energie molto elevate, però, la differenza di massa aveva un effetto trascurabile.

Quando la temperatura dell'universo scese a 10 miliardi di kelvin, la differenza di massa diventò più significativa e il rapporto tra neutroni e protoni passò da uno a meno di 1/3. Quando l'universo raggiunse la temperatura di un miliardo di kelvin il rapporto era leggermente inferiore a 1/7. A quel punto la temperatura era sufficientemente bassa da permettere a protoni e neutroni di cominciare a fondersi nel più semplice dei nuclei complessi: il deuterio, formato da un protone e un neutrone. Le interazioni del deuterio con altri protoni e neutroni produssero il trizio (con un protone e due neutroni) e l'elio 3 (due protoni e un neutrone). Tali nuclei interagirono a loro volta producendo elio 4 (due protoni e due neutroni). Dato che l'elio 4 è il più strettamente legato dei nuclei leggeri, la serie di reazioni trasformò quasi tutti i neutroni esistenti alla temperatura di un miliardo di kelvin in elio 4. La reazione di quest'ultimo rispettivamente con elio 3 e trizio diede origine a piccole quantità di berillio 7 (quattro protoni e tre neutroni) e di litio 7 (tre protoni e quattro neutroni). Riassumendo, si pensa che la nucleosintesi primordiale abbia prodotto soprattutto elio 4, con tracce di deuterio, elio 3 e litio 7.

La serie di reazioni si arrestò virtualmente all'elio 4, dato che la reazione di quest'ultimo con un protone, un neutrone o un altro nucleo di elio 4 non produce alcun nucleo stabile. La maggioranza degli altri elementi fu sintetizzata all'interno delle stelle, dove la densità è sufficiente a permettere a tre nuclei di elio 4 di combinarsi per formare carbonio 12.

Le abbondanze degli elementi leggeri previste dalla teoria della nucleosintesi primordiale, come abbiamo detto, sono in accordo pressoché totale con quelle osservate. Secondo la teoria, la materia iniziò a formarsi quando il rapporto tra neutroni e protoni era uguale a 1/7. Dato che quasi tutti i neutroni furono inglobati nei nuclei di elio 4 (che contengono un numero uguale di protoni e neutroni), l'abbondanza di questo elemento dovrebbe corrispondere a circa un quarto della massa totale della materia comune. In effetti, l'abbondanza di elio 4 osservata nella nostra e nelle altre galassie va dal 20 al 30 per cento circa. Le abbondanze previste per il deuterio, l'elio 3 e il litio 7, che vanno da meno di una parte su 10 000 fino a una parte su 10 miliardi, sono anch'esse in accordo con le abbondanze osservate.

Come può la teoria della nucleosintesi primordiale porre un limite al numero di famiglie di particelle elementari? Molto semplicemente, se il numero delle famiglie è superiore a tre o quattro, l'abbondanza prevista di elio 4 dovrebbe superare quella osservata.

Il motivo per cui si può fare questa affermazione è che le abbondanze previste degli elementi leggeri dipendono soltanto da due variabili: la densità di nucleoni e la densità di radiazione nell'universo. Purtroppo non è noto con esattezza il valore di nessuna delle due variabili, ma si è visto che soltanto un piccolo intervallo di valori di ciascuna variabile fornisce abbondanze in accordo con quelle osservate. Sostituendo i valori delle abbondanze osservate nelle relative equazioni, si può determinare quali devono essere le densità di nucleo-

La storia termica dell'universo, a partire da 10^{-43} secondi dopo il big bang e arrivando fino al momento attuale, indica che la maggior parte dell'elio 4, dell'elio 3, del deuterio e del litio 7 esistenti nell'universo furono sintetizzati all'incirca un minuto dopo il big bang. Gli elementi più pesanti, viceversa, cominciarono a essere prodotti solo decine di milioni di anni più tardi, all'interno delle stelle.

ni e di radiazione. La conoscenza di tali valori porta a un certo numero di conclusioni interessanti.

La densità di un gas di nucleoni aumenta proporzionalmente al cubo della temperatura; quindi, con un universo due volte più caldo di oggi, la densità di nucleoni doveva essere otto volte maggiore. Determinando quale avrebbe dovuto essere la densità di nucleoni durante la nucleosintesi per produrre le abbondanze di deuterio, elio 3 e litio 7 che si osservano oggi, si può calcolare la densità di nucleoni attuale, che risulta compresa tra 2×10^{-31} e 5×10^{-31} grammi al centimetro cubo. Tale intervallo di valori è in accordo con la densità della materia luminosa ricavata da studi della dinamica di galassie e ammassi galattici, ma è almeno 10 volte inferiore alla densità di massa gravitazionale che si ritiene sia necessaria per «chiudere» l'universo, ovvero per arrestare l'espansione avviata dal big bang. Se l'universo è chiuso, è necessario ammettere l'esistenza di materia non nucleonica. Attualmente si ricerca tale materia, che dovrebbe essere oscura, ossia invisibile ai telescopi, e formata da qualcosa di diverso dai nucleoni (si veda l'articolo *La materia oscura dell'universo* di Lawrence M. Krauss in «Le Scienze» n. 222, febbraio 1987).

Una linea di ragionamento analoga per la densità di radiazione dà il limite massimo per il numero di famiglie di particelle elementari. La densità di radiazione è importante per la nucleosintesi primordiale, perché essa controllava la velocità di espansione dell'universo a quell'epoca. La densità di radiazione è in ogni istante proporzionale al numero di tipi di radiazione o, analogamente, al numero di tipi di particelle in moto a velocità prossima a quella della luce. Si ritiene che durante la nucleosintesi primordiale esistessero nove tipi di particelle relativistiche: il fotone (ovviamente), l'elettrone e il positrone, il neutrino elettronico, il neutrino muonico, il neutrino tauonico e le loro tre antiparticelle. I neutrini sono privi di massa o hanno una massa così piccola da muoversi quasi alla stessa velocità della luce; l'elettrone e il positrone hanno masse abbastanza piccole da far pensare che, alle alte energie raggiunte all'epoca della nucleosintesi primordiale, avrebbero dovuto muoversi anch'essi a velocità di poco inferiore a quella della luce. La densità di radiazione associata ai nove tipi di particelle dà origine a condizioni che sarebbero state proprio quelle necessarie per produrre l'abbondanza di elio 4 osservata. (È interessante notare che la densità di elio 4 è virtualmente indipendente dalla densità di nucleoni, fatto osservato per la prima volta da Fred Hoyle e Roger Taylor negli anni sessanta e confermato poi più rigorosamente da altri ricercatori.)

Nel calcolare l'abbondanza di elio 4 abbiamo ammesso l'esistenza di fotoni, elettroni e dei tre neutrini conosciuti, con le relative antiparticelle. Se esistessero ulteriori famiglie di particelle fondamentali, i calcoli dovrebbero venire modificati. Gli unici membri di una nuova famiglia in grado di influenzare i calcoli sono i neutrini, dal momento che, in qualsiasi famiglia oltre la prima, solo essi sono sufficientemente leggeri da muoversi a velocità di poco inferiore a quella della luce. Presumibilmente ogni nuova famiglia oltre la terza dovrebbe comprendere un neutrino e il corrispondente antineutrino.

Se il gas dal quale era formato l'universo avesse contenuto altri neutrini, la sua densità di radiazione sarebbe stata maggiore e, di conseguenza, l'espansione cosmologica durante il periodo della nucleosintesi primordiale sarebbe stata più rapida. Di fatto, il rapporto tra neutroni e protoni è molto sensibile alla velocità di espansione cosmologica. Una velocità di espansione maggiore avrebbe concesso ai neutroni meno tempo per trasformarsi in protoni e quindi sarebbero rimasti più neutroni: il rapporto tra neutroni e protoni sarebbe stato maggiore. E dal momento che i neutroni vennero rapidamente inglobati nei nuclei di elio 4, l'abbondanza di questo elemento dovrebbe risultare superiore.

L'elio 4 è il più abbondante tra i nuclei sintetizzati nel big bang ed è quindi l'elemento che i ricercatori sono in grado di misurare con la precisione più alta. Dato però che l'elio 4 viene prodotto anche nelle stelle, è importante stimare quale frazione dell'elio osservato negli oggetti astronomici sia primordiale (ossia prodotta nel big bang) e quale sia stata sintetizzata nelle stelle dopo il big bang. In collaborazione con John S. Gallagher del Lowell Observatory, abbiamo trovato che si può determinare la quantità addizionale di elio 4 prodotta nelle stelle misurando il loro contenuto di carbonio; dal momento che le stelle che producono elio producono anche carbonio, le abbondanze dei due elementi aumentano in modo concomitante. Ciò ci permette di «sottrarre» il contributo dell'elio 4 prodotto dalle stelle dall'abbondanza osservata per ricavare la vera abbondanza primordiale. Abbiamo così determinato che il massimo valore possibile per l'abbondanza primordiale di elio 4 è di poco inferiore al 25 per cento.

Le abbondanze di elio 4, elio 3, deuterio e litio 7 previste dal modello del big bang (*curve*) sono in ottimo accordo con le abbondanze ricavate dalle osservazioni (*fasce orizzontali in colore*). Le abbondanze previste variano in funzione della densità di nucleoni (protoni e neutroni) all'epoca della nucleosintesi primordiale; la fascia verticale in colore indica la migliore stima della densità attuale in base ai dati osservativi. L'ottimo accordo tra teoria e osservazioni è una delle argomentazioni più forti a sostegno del modello del big bang.

I nostri calcoli dimostrano che dal big bang avrebbe potuto derivare un'abbondanza così bassa soltanto se esiste non più di un ulteriore tipo di neutrini e antineutrini. Se fossero esistiti più neutrini, la densità di radiazione sarebbe stata così grande che la quantità di elio 4 prodotta durante la nucleosintesi primordiale sarebbe maggiore dell'abbondanza osservata. In altri termini, il numero totale di famiglie di particelle elementari è tre o al massimo quattro. La nostra scoperta fa pensare che tutte le famiglie fondamentali di particelle elementari possano essere già state trovate. Questa tesi è stata da noi avanzata più di 10 anni fa in collaborazione con James E. Gunn della Princeton University; in seguito le misure dell'abbondanza di elio 4 e la stima del suo valore primordiale sono migliorate in modo significativo. Ciò che rende la questione particolarmente interessante e attuale è il fatto che gli acceleratori di particelle cominciano a essere in grado di verificarla.

La ricerca di nuovi tipi di neutrini è sempre stata difficile e noiosa. Il solo mezzo per scoprire un neutrino era di produrre il leptone carico a esso associato e di osservarne il decadimento. L'inconveniente del metodo è che, sebbene i neutrini siano leggerissimi o addirittura privi di massa, occorre una gran quantità di energia per produrre i leptoni a essi associati; più grande è la massa del leptone associato, più grande è l'energia a cui deve arrivare l'acceleratore per produrlo. Per esempio, la particella tau ha una massa così grande che Martin L. Perl e collaboratori dello Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) hanno avuto bisogno di un'energia di molti miliardi di elettronvolt, corrispondente a una temperatura superiore a 10^{13} kelvin, per scoprirla. Con tali prospettive si può sempre supporre che altri leptoni si trovino oltre i limiti degli attuali acceleratori.

Il nuovo metodo per «andare a caccia» di neutrini è nato dagli esperimenti del CERN già citati, che hanno dimostrato come le forze debole ed elettromagnetica siano in realtà manifestazioni differenti di una sola forza elettrodebole. Nel 1983 i ricercatori del CERN, un gruppo di centinaia di fisici guidato da Carlo Rubbia, raggiunsero l'obiettivo che si erano prefissati: dimostrare l'esistenza dei bosoni vettori intermedi, gli ipotetici portatori della forza nucleare debole. Vennero scoperte tre di tali particelle, i bosoni W^+, W^- e Z^0.

Particolarmente significativa per la nostra ricerca è stata la scoperta del bosone Z^0. Esso è elettricamente neutro, il che significa che può decadere in coppie di neutrini e antineutrini, dal momento che anch'essi sono elettricamente neutri. (Il bosone Z^0 può anche decadere in coppie di particelle e antiparticelle cariche, quali elettroni e positroni.) In altre parole, il bosone Z^0 ci permette di ottenere direttamente ogni tipo di neutrino, senza dover prima produrre il leptone a esso associato. La sua vita media serve come misura del numero di famiglie di particelle elementari, poiché quante più sono le famiglie, tanto più numerose sono le possibilità di decadimento della particella. Ne consegue che un maggior numero di famiglie significa una vita media più breve del bosone Z^0. Accurate misurazioni della vita media di questo bosone potrebbero quindi dare indicazioni sul numero di famiglie di particelle elementari.

Per misurare le proprietà di decadimento del bosone Z^0 è necessario per prima cosa disporre di una macchina con energia sufficiente a produrre tale particella. Gli acceleratori di vecchio modello, nei quali fasci di protoni o di elettroni di alta energia colpivano bersagli fissi, impiegavano la maggior parte della loro energia nel movimento dei fasci, lasciandone relativamente poca a disposizione per la produzione di particelle. Il nuovo corso intrapreso con la macchina del CERN, che sfrutta un'idea di Simon van der Meer, è di far collidere frontalmente protoni e antiprotoni in modo da poter utilizzare la maggior parte dell'energia nella produzione di nuove particelle.

Oggi sono molti gli acceleratori, installati in varie parti del mondo, che sfruttano le collisioni frontali. Il Tevatron del Fermilab utilizza protoni e antiprotoni; lo SLAC e il Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) impiegano elettroni e positroni. Benché le energie accessibili a queste ultime due macchine siano troppo basse per produrre veri bosoni Z^0, esse possono talvolta, a causa di fenomeni quantomeccanici, dare origine a particelle «virtuali» che simulano gli effetti del bosone Z^0.

I risultati preliminari indicano l'esistenza di non più di cinque famiglie di particelle elementari. David B. Cline dell'Università della California a Los Angeles e dell'Università del Wisconsin a Madison, uno dei responsabili degli esperimenti sul conteggio dei neutrini al CERN, ha dimostrato che la vita media

L'abbondanza di elio 4 suggerisce l'esistenza di non più di quattro famiglie di particelle elementari. L'illustrazione mostra un ingrandimento della parte della curva dell'elio 4 che giace all'interno della fascia verticale nella figura della pagina a fronte; la stretta curva che appare in quell'illustrazione è risolta qui in tre curve allargate. La curva inferiore rappresenta l'abbondanza di elio 4 prevista nel caso in cui esistano due famiglie di particelle, la curva centrale dà l'abbondanza prevista con tre famiglie e quella superiore l'abbondanza prevista con quattro famiglie. Le abbondanze di elio 4 che si ottengono nei primi due casi ricadono ampiamente nella regione definita in base ai dati osservativi e alle stime della densità di nucleoni (*in verde*). Se esistesse una quarta famiglia, l'abbondanza sarebbe molto vicina ai limiti permessi; è evidente che non vi è posto per più di quattro famiglie.

Presso vari acceleratori in tutto il mondo sono oggi in corso verifiche del numero di famiglie di particelle esistenti. Il bosone vettore intermedio Z^0 può decadere in coppie particella--antiparticella di quark e leptoni. (Un'antiparticella ha la stessa massa della particella corrispondente, ma proprietà elettriche opposte; generalmente è rappresentata con il simbolo della relativa particella soprassegnato.) Le linee continue indicano i decadimenti permessi. Più alto è il numero di famiglie, più numerosi sono i possibili schemi di decadimento del bosone Z^0 e minore la sua vita media. Misure della vita media di questa particella dovrebbero perciò dare indicazioni sul numero di famiglie di particelle. Le attuali stime limitano a cinque tale numero; futuri esperimenti dovrebbero fornire dati più precisi.

del bosone Z^0 è all'incirca quella prevista nel caso in cui le famiglie di particelle elementari siano soltanto tre. Tuttavia, le incertezze sperimentali portano ad ammettere la possibile esistenza di altri due tipi di neutrini e quindi di altre due famiglie. Theodore L. Lavine, un laureando dell'Università del Wisconsin, combinando i dati dello SLAC e del DESY ha ottenuto un limite analogo, circa cinque, al numero totale di neutrini. Per la prima volta gli acceleratori permettono di contare i tipi di neutrini e forniscono un totale piccolo, in accordo con le previsioni della teoria cosmologica, ma non con quelle della fisica delle particelle.

La prossima fase promette di essere ancora più entusiasmante. Quando gli acceleratori attualmente in costruzione saranno completati e cominceranno a produrre dati affetti da minori incertezze, sarà possibile verificare con estrema precisione il limite cosmologico di tre o al massimo quattro famiglie. L'acceleratore dello SLAC è in fase di ristrutturazione e nella nuova versione si chiamerà Stanford Linear Collider; un altro acceleratore è in costruzione al CERN, il collisore LEP (Large Electron-Positron). Entrambe le macchine saranno in grado di produrre un gran numero di bosoni Z^0 e consentiranno di osservare l'universo primordiale con un'efficacia che nessun telescopio potrà mai uguagliare.

BIBLIOGRAFIA

SCHRAMM DAVID N., *The Early Universe and High-energy Physics* in «Physics Today», 36, n. 4, aprile 1983.

STEIGMAN GARY e BOESGAARD MERCHANT ANN, *Big Bang Nucleosynthesis: Theories and Observations* in «Annual Review of Astronomy and Astrophysics», 23, pp. 319-378, 1985.

CLINE DAVID B., SCHRAMM DAVID N. e STEIGMAN GARY, *Neutrino Families: the Early Universe Meets Elementary Particle/Accelerator Physics* in «Comments on Nuclear and Particle Science», 17, n. 3, 1987.

Le perovskiti

Molti dei nuovi superconduttori ad alta temperatura appartengono a una famiglia di materiali ceramici, le perovskiti, che per la loro struttura adattabile presentano un'ampia variabilità di caratteristiche elettriche

di Robert M. Hazen

Meno di tre anni fa, K. Alex Müller e J. Georg Bednorz del Laboratorio di ricerca dell'IBM a Zurigo scoprirono un materiale che era superconduttore a temperature più alte di quanto si fosse mai ottenuto prima. Esso non presentava alcuna resistenza al flusso di corrente elettrica fino a 28 kelvin (gradi Celsius sopra lo zero assoluto). Da quel momento sono stati fabbricati altri superconduttori di questo tipo che funzionano a temperature di 100 kelvin e oltre. Di preciso, perché questi materiali siano superconduttori rimane un mistero; tuttavia, vari gruppi di ricerca, tra cui quello composto dai miei colleghi e da me presso il Geophysical Laboratory della Carnegie Institution di Washington, hanno messo in evidenza ciò che questi nuovi superconduttori hanno in comune: sono tutti materiali strutturalmente difettosi, appartenenti alla famiglia cristallografica denominata «perovskiti».

Le perovskiti, che prendono il nome dal minerale specifico perovskite, sono ceramiche, ossia materiali solidi dati dalla combinazione di elementi metallici con elementi non metallici (generalmente ossigeno) disposti in una particolare struttura atomica. Si tratta dei minerali più abbondanti nella Terra e da molto tempo richiamano l'attenzione dei geologi per gli indizi sulla storia del pianeta che in essi sono contenuti. Le perovskiti sono assai interessanti anche dal punto di vista tecnologico poiché nel loro insieme, naturali e sintetiche, esse presentano un'ampia gamma di proprietà elettriche. Mentre una data struttura cristallina è di solito associata a una specifica proprietà elettrica, le perovskiti vanno dagli isolanti ai semiconduttori, ai conduttori superionici (in cui interi ioni, anziché i soli elettroni, fluiscono attraverso il cristallo), ai conduttori di tipo metallico e, adesso, ai superconduttori ad alte temperature. Attualmente le perovskiti costituiscono la base di una industria delle elettroceramiche con un giro annuo di affari di 20 miliardi di dollari, ma questa cifra potrebbe ben presto diventare trascurabile rispetto alle prevedibili applicazioni dei superconduttori ad alta temperatura.

Come si spiega questa notevole gamma di proprietà? La risposta è suggerita dai difetti strutturali nei superconduttori: lievi modificazioni della struttura ideale della perovskite spesso generano nuove caratteristiche. Non esiste una correlazione univoca, vale a dire, una determinata modificazione non produce automaticamente un particolare grado di conduttività elettrica: eppure, ogni volta che la struttura ideale viene alterata, si presenta la possibilità di nuove caratteristiche, elettriche o di altra natura.

La struttura delle perovskiti

Nella loro forma ideale le perovskiti, la cui formula generale è ABX_3, consistono di cubi composti da tre diversi elementi chimici (A, B e X), presenti nel rapporto 1 : 1 : 3. A e B sono cationi metallici (ioni con carica positiva), mentre X è un anione non metallico (uno ione con carica negativa). Un catione A, il più grande dei due metallici, si trova al centro di ciascun cubo; i cationi B occupano tutti gli otto vertici e gli anioni X stanno nei punti mediani dei 12 spigoli del cubo (*si veda l'illustrazione a pagina 44*). Come si può immaginare, il minerale perovskite (la varietà di titanato di calcio, $CaTiO_3$, che si forma ad alta temperatura) rappresenta la struttura ideale. La sua cella elementare (blocco costruttivo fondamentale) è formata da un solo cubo. Il calcio nella posizione A è più grande del titanio nelle posizioni B e l'ossigeno occupa tutte le posizioni X. Il cristallo cresce spesso in forma cubica o ottaedrica, rispecchiando la simmetria della struttura atomica.

Un profano in materia di cristalli potrebbe domandarsi perché un cristallo composto di unità che presentano uno ione A, otto ioni B e 12 ioni X abbia formula ABX_3 piuttosto che AB_8X_{12}. La ragione di ciò è che ciascun cubo è circondato da ogni lato da altri cubi, con i quali condivide vertici e spigoli, cosicché a ciascun cubo spetta solo una frazione degli ioni esterni, quelli cioè che stanno ai vertici e sugli spigoli. Tenendo conto degli ioni condivisi, si considera che a ogni cubo spettino uno ione A, uno ione B «intero» (otto ottavi) e tre ioni X «interi» (dodici quarti).

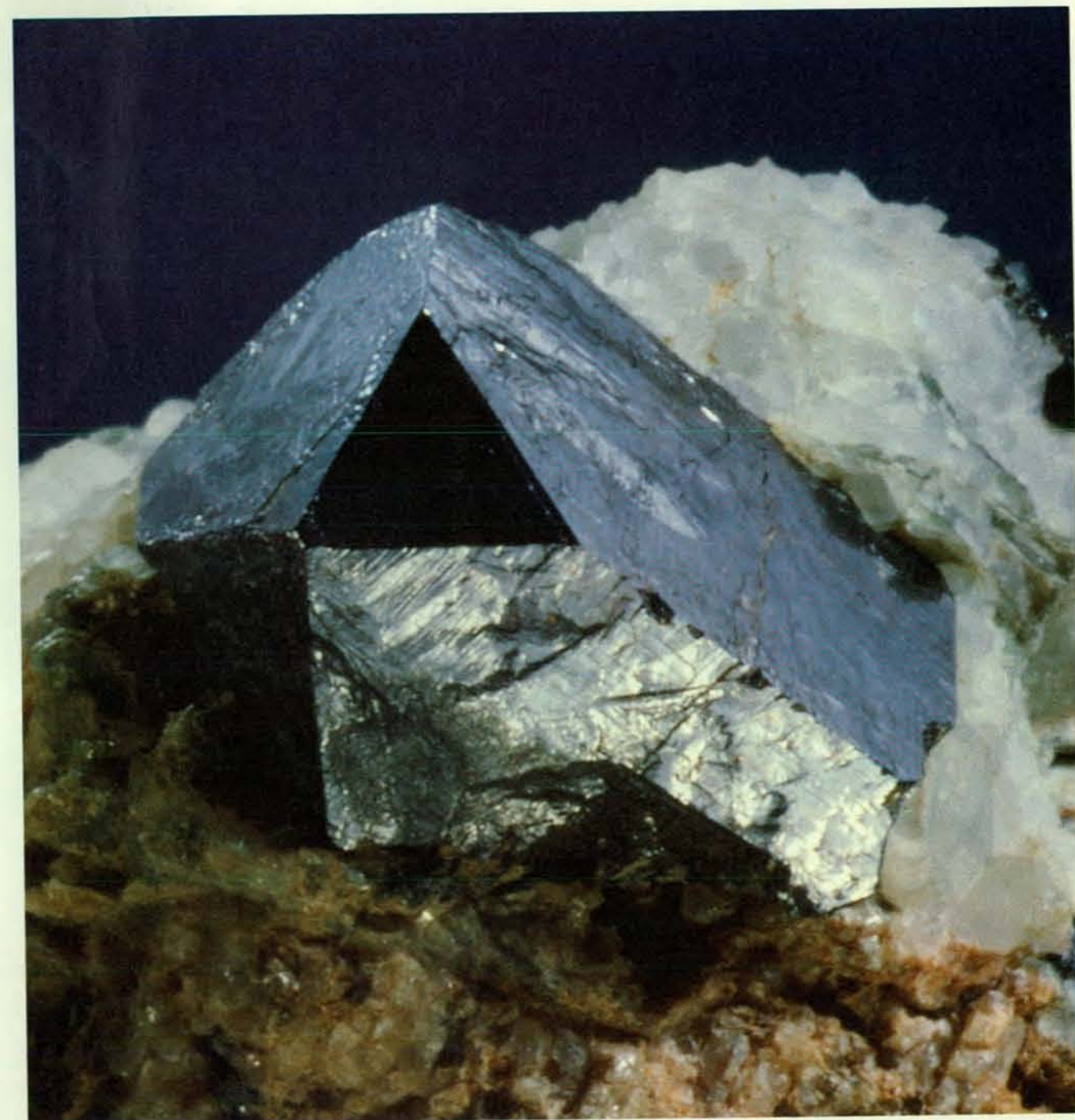
Moltissimi elementi possono combinarsi a formare le centinaia di perovskiti, ideali o modificate, che oggi si conoscono. Il bario, il potassio e gli elementi delle terre rare (dal cerio fino al lutezio, cioè i numeri dal 58 al 71 nel sistema periodico degli elementi) sono, fra la ventina di elementi che possono occupare la posizione A, i più tipici. È noto che la posizione B può essere occupata dallo strabiliante numero di quasi 50 elementi, più della metà del sistema periodico. Le posizioni X possono essere occupate non solamente dall'ossigeno, ma anche da elementi non metallici della famiglia degli alogeni: fluoro, cloro e bromo. Fra le decine di composti che corrispondono alla struttura ideale della perovskite vi sono sostanze molto diverse quali, per esempio, il fluoruro di argento e zinco ($AgZnF_3$), il bromuro di cesio e cadmio ($CsCdBr_3$), il fluoruro di litio e bario ($LiBaF_3$), lo iodato di potassio (KIO_3) e l'alluminato di europio ($EuAlO_3$).

Come altri materiali ceramici, queste perovskiti ideali sono isolanti elettrici: tutte le posizioni atomiche sono occupate e forti legami ionici mantengono saldamente al loro posto gli atomi e i loro elettroni. Di conseguenza gli elettroni si muovono solo con difficoltà attraverso il cristallo. I forti legami nella maggior parte delle perovskiti ideali fanno sì che questi materiali siano resistenti alla scalfittura, difficili da deformare e ad alto punto di fusione. Inoltre, dato che i legami lungo ciascuno dei tre assi del cubo sono simili, si ha isotropia, cioè uguale comportamento nelle tre dimensioni: alcune proprietà del materiale, come la compressibilità e la conduttività elettrica, sono le stesse lungo ciascuno degli assi.

Non tutte le perovskiti, comunque, corrispondono a questo modello di isolante isotropo. Un certo numero di esse devia leggermente dall'ideale, per forma o per composizione, e assume quindi un comportamento meno prevedibile.

Abbondanza di alterazioni semplici

In molti casi il catione centrale A è troppo piccolo rispetto ai cationi B posti ai vertici del cubo e le strutture delle perovskiti ne sono alquanto distorte. Questa irregolarità fa sì che gli ioni X e talvolta gli ioni B si spostino dalla loro posizione ideale.

I cristallografi spesso visualizzano tali spostamenti immaginando la cella elementare ideale non come un semplice cubo, ma come un aggregato di poliedri (*si veda l'illustrazione a pagina 44*). Ciascun catione B, che definisce il vertice comune di cubi contigui, è strettamente legato ai sei anioni che lo circondano, uno per ciascuno dei sei spigoli di cubo che convergono sul vertice occupato dallo stesso catione B. Tali anioni definisco-

La perovskite tipica (di cui si vede un frammento) è un minerale raro che si forma dal titanato di calcio ($CaTiO_3$) ad alta temperatura. Anche altri composti della famiglia delle perovskiti generalmente si conformano alla formula ABX_3, in cui A e B sono metalli e X è un non metallo. La maggior parte delle perovskiti naturali è isolante; tuttavia deviazioni rispetto alla formula tipica o alla struttura atomica possono dar luogo a proprietà elettriche diverse. La perovskite tipica è un isolante; essa fu descritta per la prima volta poco dopo il 1830 dal geologo Gustav Rose che le diede questo nome in onore del mineralista russo conte Lev Alekseevich von Perovski.

no i vertici di un ottaedro. Il catione A, che prima si immaginava al centro di un semplice cubo, ora è considerato come circondato da otto ottaedri con i vertici in comune, ciascuno dei quali contiene nel centro un catione B. Quando un catione A è troppo piccolo rispetto ai cationi B, gli ottaedri (i cui assi in una perovskite ideale sono allineati e paralleli) si inclinano e si distorcono e la struttura collassa intorno ai cationi A, abbassando il grado di simmetria e alterando potenzialmente le proprietà ottiche, elastiche ed elettriche e le altre caratteristiche fisiche della perovskite in questione. Sono state identificate decine di forme di distorsione nelle perovskiti.

Nelle perovskiti distorte i cationi B possono rimanere al centro degli ottaedri come in quelle ideali, ma in alcune i cationi B risultano lievemente spostati. Questa «eccentricità» dei cationi, provocando lo spostamento di cariche positive, può conferire ai cristalli di perovskite una polarità elettrica: una estremità del cristallo si carica positivamente e l'altra negativamente. Inoltre il senso della deviazione dal centro può essere spesso invertito sottoponendo semplicemente il campione a un campo elettrico. I materiali che si polarizzano elettricamente e che al tempo stesso possono invertire la loro polarità sotto l'influenza di un campo elettrico si dicono ferroelettrici e hanno molteplici applicazioni nelle apparecchiature elettroniche.

Una perovskite ferroelettrica sintetica, il titanato di bario ($BaTiO_3$), è forse l'elettroceramica di uso industriale più nota. I suoi cationi eccentrici catturano e liberano energia elettrica in modo efficientissimo: quanto più il campo elettrico applicato è forte, tanto più i cationi si caricano di energia e si spostano e tanto più fortemente il cristallo si polarizza; quando poi il campo elettrico viene tolto, i cationi ritornano lentamente alla loro posizione normale, liberando l'energia elettrica immagazzinata.

Per questo motivo il titanato di bario viene spesso incorporato nei condensatori, quegli elementi dei circuiti elettronici che servono a livellare un flusso di corrente con alti e bassi: questi condensatori possono immagazzinare carica elettrica dagli impulsi di corrente e poi rilasciare fra un impulso e l'altro la carica accumulata, producendo così una corrente continua costante. Il titanato di bario ha anche trovato vaste applicazioni nei dispositivi che proteggono i calcolatori da sbalzi brevi, ma cospicui, di tensione: quando un impulso elettrico forte e improvviso (per esempio quello prodotto da un fulmine) raggiunge il cristallo, questo lo assorbe, per poi dissiparlo lentamente.

I cationi eccentrici del titanato di bario contribuiscono anche alla piezoelettricità, proprietà che viene sfruttata industrialmente. Quando un campo elettrico esterno sposta gli atomi di titanio, il cristallo nel suo insieme cambia forma, allungandosi un po'. Inversamente, la deformazione meccanica di un cristallo di titanato di bario dà origine a un campo elettrico. La piezoelettricità rende il titanato di bario prezioso per la costruzione di trasduttori che convertono energia meccanica in energia elettrica e viceversa. Negli altoparlanti, per esempio, i trasduttori di titanato di bario vibrano contro una membrana in risposta a segnali elettronici, generando onde sonore. Nei microfoni questi trasduttori immagazzinano e poi rilasciano energia elettrica in risposta alla pressione esercitata dalle onde sonore.

Cationi misti

Le perovskiti con cationi eccentrici e ottaedri inclinati spesso corrispondono alla semplice formula ABX_3. Tuttavia queste e altre perovskiti possono anche deviare dalla composizione ideale: le loro posizioni A e B possono essere occupate da due o più tipi di cationi. Per esempio, nell'ossido di calcio e uranio (Ca_2CaUO_6) gli atomi di calcio occupano tutte le posizioni A disponibili, mentre le posizioni ottaedriche B sono equamente divise tra gli ioni calcio e quelli uranio. I due tipi di cationi B si «ordinano», vale a dire si alternano rigorosamente in tali posizioni in tutta la struttura, la quale risulta distorta perché gli ioni calcio nelle posizioni B hanno un raggio considerevolmente più grande degli ioni uranio.

I centri degli ottaedri possono essere occupati non soltanto da due elementi diversi, ma anche da ioni dello stesso elemento con carica differente. L'ossido di bario e bismuto, un semiconduttore lucente color bronzo, a volte descritto con la formula $BaBiO_3$, è una di queste perovskiti a «valenza mista». Esso possiede due distinte varietà di cationi bismuto: una varietà che ha perduto tre elettroni di valenza (gli elettroni del guscio più esterno) e un'altra che ne ha perduti cinque. La formula comunemente usata è pertanto: $Ba_2Bi^{3+}Bi^{5+}O_6$. Come avviene per l'ossido di calcio e uranio, gli ottaedri contenenti i due tipi di cationi si alternano in tutto il cristallo.

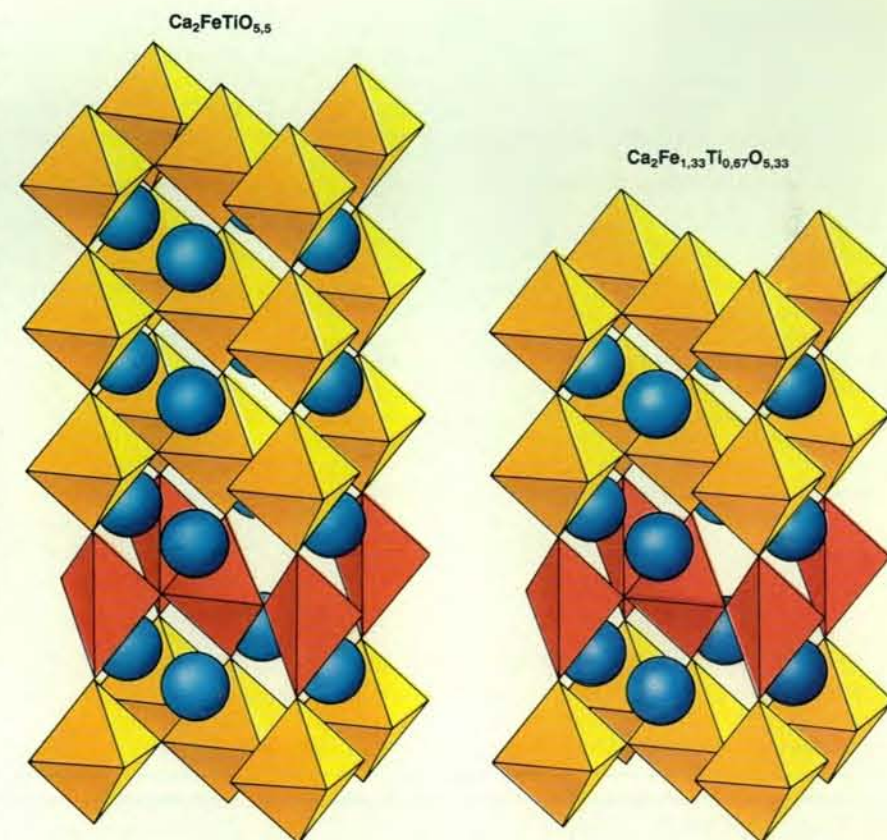
L'ossido di bario e piombo ($BaPbO_3$), un conduttore nero di tipo metallico, fornisce una clamorosa dimostrazione dei cambiamenti di proprietà che possono risultare da lievi variazioni negli elementi che occupano le posizioni B. Sostituendo il piombo con quantità via via maggiori di bismuto, si può creare una «serie continua» di varianti di composizione, dall'ossido di bario e piombo all'ossido di bario e bismuto. Quando la composizione si avvicina alla formula $BaPb_{0,8}Bi_{0,2}O_3$, il composto diventa semiconduttore. Inoltre, a differenza sia dell'ossido di bario e piombo sia dell'ossido di bario e bismuto, alcuni dei composti intermedi diventano superconduttori quando vengono raffreddati fin quasi allo zero assoluto.

Le sostituzioni nelle posizioni reticolari proprie del catione B vengono messe a profitto nel gruppo industrialmente importante delle perovskiti che vanno nel loro insieme sotto il nome di *PZT*. La denominazione comprende il titanato di piombo e la serie continua che si ha quando lo zirconio si sostituisce al titanio fino a formare lo zirconato di piombo ($PbZrO_3$). Tutti i cristalli di *PZT* presentano un effetto piezoelettrico notevolmente intenso (una lieve compressione può dar luogo all'immagazzinamento e alla liberazione di un potenziale elettrico di 100 volt); essi sono impiegati in un vasto assortimento di apparecchi, che comprende i cicalini ad altoparlante, i relè elettrici, i manometri e le candele di accensione dei motori di piccole falciatrici. In risposta a un campo elettrico, i cristalli di *PZT* di composizione diversa vibrano a frequenze distinte. L'effetto dovuto alla composizione viene sfruttato nella progettazione di apparecchi televisivi, nei quali queste perovskiti sono impiegate come filtri per ridurre i disturbi: i cristalli intercettano gli impulsi elettrici in ingresso e mascherano le frequenze indesiderabili.

Molteplicità di cationi A

Un altro tipo di variazione di composizione - una molteplicità di cationi diversi nelle posizioni A - potrebbe determinare le proprietà dell'interno della Terra. I miei colleghi e io presso il Geophysical Laboratory abbiamo studiato a fondo il silicato di magnesio e ferro ($(Mg,Fe)SiO_3$) che, a una pressione di parecchie centinaia di migliaia di atmosfere, assume la struttura delle pe-

L'unità strutturale fondamentale delle perovskiti è un cubo (*a*). Uno ione metallico (*A*) si trova al suo centro, otto ioni metallici più piccoli (*B*) occupano i vertici e dodici ioni non metallici (*X*) occupano i punti mediani degli spigoli. *A* e *B* sono cationi, o ioni con carica positiva, e gli atomi *X* sono anioni, hanno cioè carica negativa. La formula delle perovskiti è ABX_3 e non AB_8X_{12}, perché ciascun catione *B* è condiviso da otto cubi contigui e ciascun anione *X* da quattro. I cristallografi sostituiscono spesso il modello a cubo con uno a poliedri (*b*). I sei anioni *X* che circondano ciascun catione *B* e sono strettamente legati a esso formano i vertici di un ottaedro (*in giallo*). In un modello di questo tipo l'unità strutturale fondamentale diventa un raggruppamento di otto ottaedri collegati ai vertici intorno a un catione *A* (*c*). Il cristallo nell'insieme è un reticolo continuo di tali raggruppamenti (*d*). I poliedri raffigurati in questa illustrazione e in quelle seguenti si basano su immagini prodotte al calcolatore da Ross J. Angel del Geophysical Laboratory della Carnegie Institution di Washington, il quale si è servito di una versione modificata del programma STRUPLO.

Le deviazioni dalla formula tipica e dalla struttura atomica della perovskite sono evidenti nel silicato di magnesio e ferro e nell'ossido di calcio e uranio. Nel primo composto (*a sinistra*) due elementi diversi (magnesio e ferro) possono occupare la posizione *A* (*in blu*) dando luogo alla formula $(Mg,Fe)SiO_3$. Nell'ossido di calcio e uranio (*a destra*) solamente il calcio occupa la posizione *A*; esso però si alterna con l'uranio nelle posizioni *B*. La formula del composto è Ca_2CaUO_6. Nel silicato di magnesio e ferro, le unità strutturali ottaedriche sono inclinate perché ambedue i tipi di cationi *A* sono troppo piccoli per sostenere in una posizione più «diritta» gli ottaedri con il silicio al centro. Nell'ossido di calcio e uranio, sono i cationi *B* a essere «scompagnati»: le posizioni degli ottaedri sono distorte perché quelli con il calcio al centro (*in giallo*) sono alquanto più grandi di quelli con l'uranio (*in rosso*).

Nelle perovskiti deficienti di ossigeno a volte si forma una struttura a strati: interi piani di ottaedri vengono sostituiti da poliedri più piccoli. In due dei composti deficienti di ossigeno che si formano quando il ferro sostituisce una parte del titanio nel titanato di calcio, $Ca_2FeTiO_{5,5}$ (*a sinistra*) e $Ca_2Fe_{1,33}Ti_{0,67}O_{5,33}$ (*a destra*), uno strato ogni quattro e uno ogni tre, rispettivamente, sono costituiti da tetraedri con un atomo di ferro al centro (*in rosso*).

Il titanato di bario ($BaTiO_3$) corrisponde strettamente alla formula tipica delle perovskiti, cioè ABX_3. Esso, però, non ha una vera struttura cubica (*a*), dato che i suoi cationi *B* (titanio) sono leggermente eccentrici (*b*). Di conseguenza il cristallo è polarizzato: quando viene sottoposto a un campo elettrico (*c*), gli ioni titanio cambiano orientazione spostandosi verso l'elettrodo di carica negativa; con il mutare dell'orientazione cambia pure la forma del cristallo di titanato di bario. Questo fenomeno è definito piezoelettricità e trova applicazione in numerosi apparecchi elettronici. Per chiarezza gli spostamenti degli atomi di titanio sono stati molto esagerati.

rovskiti. Le parentesi indicano che le proporzioni di magnesio e di ferro che occupano le posizioni *A* possono variare. Dato che il magnesio e il ferro sono piuttosto piccoli, gli ottaedri che circondano gli atomi di silicio posti ai vertici del cubo non possono rimanere in posizione diritta, ma si inclinano.

Studi condotti ad alte pressioni suggeriscono che il silicato di magnesio e ferro e il silicato di calcio ($CaSiO_3$), che pure ad alta pressione assume la struttura della perovskite, sono probabilmente i minerali predominanti nel mantello inferiore della Terra, regione che si estende da una profondità di circa 670 chilometri a circa 2900 chilometri e che costituisce quindi più della metà del volume del nostro pianeta. Studi fatti su minerali silicatici del mantello superiore, quali granati, olivine, spinelli e pirosseni, dimostrano che, alle pressioni e alle temperature presenti all'interno della Terra, questi silicati si trasformano e si combinano con altri minerali, dando luogo a rocce in cui predominano silicati ferromagnesiaci e di calcio, con struttura del tipo della perovskite. Gli studi indicano anche che, quando gli ioni ferro nel silicato di magnesio e ferro hanno carica +2, la perovskite che si forma è isolante, mentre quando gli ioni ferro hanno carica +3 la perovskite può diventare un conduttore di calore e di elettricità più efficiente.

Se nel mantello inferiore le perovskiti silicee ricche di ferro +3 fossero davvero abbondanti, la Terra potrebbe essere un conduttore migliore di quanto non sia stata considerata finora. La scoperta di ulteriori prove a sostegno di questa possibilità potrebbe rendere necessaria una revisione delle idee dominanti sulla temperatura iniziale della Terra, sulla sua velocità di raffreddamento nel passato e sulle previsioni riguardo al futuro. Al fine di verificare la plausibilità di tali congetture, i miei colleghi e io abbiamo in programma di effettuare nell'immediato futuro studi alle alte pressioni e temperature.

Ferro e magnesio appaiono distribuiti a casaccio nelle posizioni *A* del silicato di magnesio e ferro, ma tale disordine impallidisce a confronto di ciò che si trova in varie perovskiti naturali cristallizzate da magma vulcanico. Queste rocce, che includono, per esempio, la latrappite, la loparite e qualche altra perovskite della stessa famiglia, incorporano una pletora di elementi poco comuni; come gruppo, esse ospitano nella loro struttura calcio, sodio, potassio, ittrio, torio e tutti i 14 elementi delle terre rare nelle posizioni *A*, mentre le posizioni *B* sono occupate da titanio, niobio, ferro, manganese e zinco. La struttura delle perovskiti è così adattabile che questi minerali agiscono come spugne, «assorbendo» cioè vari elementi che non si inseriscono facilmente in altre strutture minerali. Le perovskiti che ne risultano sono incredibilmente disordinate: un dato campione può contenere circa 20 cationi *A* diversi e una decina di cationi *B*, tutti apparentemente distribuiti a caso nelle rispettive posizioni *A* e *B* del reticolo cristallino.

Ulteriore complessità

Indipendentemente da quanto siano distorte o variate dal punto di vista della composizione, tutte le perovskiti succitate sono stechiometriche, cioè hanno un totale di due cationi per ogni tre anioni. Numerose altre perovskiti, o strutture della famiglia delle perovskiti, sono non stechiometriche, cioè deviano dalla formula ideale ABX_3, nel senso che alcune posizioni normalmente occupate da atomi sono invece vacanti.

I composti della serie continua che va dalla perovskite ($CaTiO_3$) al ferrito di calcio ($CaFeO_{2,5}$), un composto deficiente di ossigeno, illustrano le conseguenze strutturali della mancanza di atomi. Nei composti deficienti d'ossigeno della serie del titanato di calcio, come $Ca_2FeTiO_{5,5}$ e $Ca_2Fe_{1,33}Ti_{0,67}O_{5,33}$, il deficit di ossigeno provoca la formazione di strati di cationi ferro in posizione *B*, che sono circondati da quattro atomi di ossigeno invece che dai normali sei atomi. Questi strati sono intercalati ad altri che presentano ottaedri normali (*si veda l'illustrazione a pagina 45 in basso*). Il cristallo nell'insieme non è uniforme, ma cresce in cristalli schiacciati, a forma di lastra, che riflettono la struttura atomica stratificata.

Tali complicazioni, quali la non stechiometria, l'inclinazione degli ottaedri, l'eccentricità dei cationi e la molteplicità di cationi diversi, possono essere presenti insieme in quasi ogni combinazione. Di fatto, sembra possibile un infinito numero di varianti della struttura delle perovskiti, eppure anche questo quadro è incompleto. In una perovskite uniforme si può, in teoria, prevedere quale sia l'ordinamento degli atomi in una parte di un cristallo analizzandone un'altra, perfino in un cristallo con ottaedri inclinati o con cationi che si alternano. Nella realtà, quasi tutte le perovskiti, come altri tipi di cristalli, non sono uniformi, sono anzi piene di difetti, di errori casuali nella struttura cristallina, che non si possono prevedere. Fra i molti piccoli difetti che possono verificarsi ricordiamo un cubo fuori posto, un poliedro anormalmente inclinato, uno strato di un tipo laddove se ne formerebbe normalmente uno di altro tipo, una qualche interruzione della sequenza di cationi e di difetti puntuali regolarmente alternati tra loro, interruzioni che derivano dalla mancanza di un singolo atomo o dalla sua sostituzione con quello di un altro elemento. I difetti nella struttura della perovskite possono presentarsi anche su scala più ampia; per esempio, nel fenomeno noto come geminazione, vaste sezioni di un cristallo possono essere perfettamente identiche ad altre sezioni, ma orientate in un senso diverso; i confini tra tali cristalli geminati spesso appaiono come striature nella massa del cristallo. La geminazione, che è una caratteristica quasi onnipresente delle perovskiti, molto probabilmente ha luogo in qualunque campione di perovskite che devii dalla forma cubica ideale e può generare effetti vistosi, favorevoli o meno, sulle proprietà elettriche. Per esempio, l'applicazione di un campo elettrico può causare uno spostamento delle superfici di separazione tra geminati. Questo fenomeno consuma energia e potenzialmente riduce la polarizzazione delle perovskiti ferroelettriche. Per garantire prestazioni affidabili ai fini delle applicazioni industriali, i produttori talvolta introducono impurezze che hanno l'effetto di «fissare» i confini tra cristalli geminati e impedire che si muovano. Per esempio, viene normalmente aggiunto manganese per fissare i confini tra geminati del titanato di bario, il quale presenta invariabilmente geminazione.

La sezione di un cristallo di titanato di bario rivela un difetto comune nelle perovskiti: la geminazione, cioè la formazione di domini essenzialmente identici fra loro, ma con diversa orientazione cristallografica. Qui la differenza fra l'andamento a strisce dei due domini riflette differenze nell'eccentricità degli atomi di titanio caratteristica del titanato di bario: nelle strisce chiare e scure contigue dell'illustrazione gli atomi di titanio sono spostati in direzioni opposte. Il campione, fornito da Robert D. Shannon della E. I. du Pont de Nemours & Company, Inc., appare di colore violaceo perché fotografato in luce polarizzata.

Superconduttori perché ricchi di difetti

In nessuna perovskite gli effetti elettrici delle variazioni strutturali o dei difetti del cristallo sono tanto notevoli quanto nelle perovskiti più recenti, vale a dire nei superconduttori ad alta temperatura. La mia familiarità con questi materiali cominciò nel febbraio 1987, in seguito a una richiesta di Ching-Wu (Paul) Chu dell'Università di Houston. Chu e i suoi collaboratori di Houston e dell'Università dell'Alabama a Huntsville avevano dimostrato, al di là di ogni dubbio, che una sostanza da loro ottenuta presentava superconduttività alla temperatura record di 93 kelvin. Essi erano arrivati a questo materiale scaldando in forno una miscela di ossidi di ittrio e di rame finemente macinati insieme a carbonato di bario.

Essi conoscevano le proporzioni degli elementi nella miscela iniziale, ma incapparono in una difficoltà: il campione di superconduttore che avevano ottenuto era una mescolanza di due fasi, o di composti chimici diversi. Osservazioni ottiche a elevato ingrandimento rivelarono che la fase principale, la quale costituiva forse i 2/3 del materiale, aveva un colore verde smeraldo cupo, era trasparente, e sembrava cristallizzare con spigoli arrotondati. L'altra fase era nera, opaca, di forma più regolare e con gli spigoli ben squadrati; si sospettò fosse il superconduttore, dato che tutti i materiali conduttori conosciuti sono opachi. Il problema era che i cristalli delle due fasi erano così ben concresciuti da rendere impossibile separarli e analizzarne la composizione con le tecniche usuali. Chu aveva bisogno di conoscere la composizione della fase superconduttrice prima di poter tentare di ottenerne una forma pura o di produrne varianti chimi-

Il diffrattrometro a quattro cerchi può dare informazioni sulla struttura di un cristallo microscopico. Il campione è orientato nel modo voluto da due «archi» che percorrono un cerchio completo (*parte interna della «ciambella» argentea e perno centrale*) e da un terzo arco che ruota l'intera ciambella. Un quarto arco (*braccio che si allunga a sinistra*) alloggia un rivelatore di raggi X per misurare posizione e intensità dei raggi X diffratti. L'apparecchio ha permesso all'autore e colleghi di dimostrare che uno dei nuovi superconduttori ad alta temperatura, l'ossido di ittrio, bario e rame, o «1-2-3», è una perovskite modificata.

che che mostrassero superconduttività a temperature ancora più alte.

Presso il Geophysical Laboratory analizziamo spesso fasi «sporche», ossia miste, quali rocce naturali e sintetiche. Per di più non eravamo impegnati per nostro conto nella «caccia» al superconduttore e pertanto non ponevamo alcuna minaccia ai diritti di brevetto di Chu. Il nostro laboratorio era quindi l'indirizzo a cui egli poteva logicamente rivolgersi per essere assistito. Oltre a me, il nostro gruppo comprendeva i cristallografi Ross J. Angel, Larry W. Finger, Charles T. Prewitt e Nancy L. Ross, il geofisico Ho-Kwang (David) Mao (il primo a essere contattato da Chu) e l'analista chimico Chris G. Hadidiacos.

Procedemmo come avremmo fatto per qualsiasi roccia a grana fine. Cercammo di determinare la natura degli elementi in ciascuna fase per mezzo di una microsonda elettronica, uno strumento che focalizza un intenso fascio di elettroni su di un piccolo campione. Gli elettroni ad alta energia eccitano gli atomi del campione e fanno sì che ciascun elemento emetta raggi X a una frequenza caratteristica. Determinammo i rapporti fra le quantità dei vari elementi misurando la proporzione di raggi X emessi a ciascuna frequenza. Sebbene le dimensioni dei granuli del superconduttore di Chu fossero quasi troppo piccole per il nostro apparecchio, alla fine fummo in grado di dedurre le proporzioni relative degli elementi chimici nelle due fasi. Gran parte dei granuli più fini, presumibilmente la fase verde, conteneva ioni ittrio, bario e rame rispettivamente in proporzione di 2 : 1 : 1. L'importante fase nera era più ricca di rame: i tre metalli erano presenti in rapporto di 1 : 2 : 3, il che spiega il nome «1-2-3» dato al superconduttore (chiamato anche YBCO dalle iniziali dei nomi degli elementi che lo costituiscono).

La nostra principale incertezza quanto alla composizione della fase nera era il numero esatto di atomi d'ossigeno, dato che la microsonda elettronica non poteva dirci nulla su quell'elemento. Pure, potemmo fare ragionevoli illazioni basandoci su una legge di natura generalmente riconosciuta, la quale sostiene che le cariche positive e le cariche negative in un cristallo devono bilanciarsi. Sapevamo che le cariche degli ioni ittrio e bario sono +3 e +2 rispettivamente, che gli ioni rame possono avere carica +1, +2 o +3 e che tutti e tre i tipi di ioni rame possono trovarsi in uno stesso composto. Un semplice calcolo aritmetico indicò che il materiale nero aveva una carica positiva totale compresa fra 10 e 16. Dato che la carica di uno ione ossigeno è −2, sapevamo che dovevano esservi da cinque a otto atomi di ossigeno ogni sei ioni di metallo. Stabilimmo che il contenuto d'ossigeno doveva essere 6,5 poiché il rame nella maggioranza dei composti ha carica +2. Pertanto, la fase nera corrispondeva approssimativamente alla formula chimica $YBa_2Cu_3O_{6,5}$.

Tramite l'analisi per diffrazione di raggi X fummo presto in grado di apprendere qualcosa sulla disposizione tridimensionale degli atomi. Quando i raggi X colpiscono un cristallo, essi vengono diffusi in direzioni specifiche e con diversa intensità, fornendo così informazioni sulla disposizione degli atomi che formano il cristallo. Sebbene la ricerca di un singolo cristallo abbastanza grande per essere studiato fosse difficile, tale era la finezza dei granuli del campione, alla fine ottenemmo alcuni frammenti neri con un diametro fra 30 e 40 micrometri (milionesimi di metro). Reputandoci fortunati, incollammo un frammento nero, troppo piccolo per essere visto a occhio nudo, all'estremità di una sottile fibra di vetro e lo irradiammo con un fascio di raggi X.

All'inizio fummo avviliti, perché ogni «singolo» frammento nero che esaminavamo si rivelava in realtà una combinazione di due o più minuti cristalli neri concresciuti l'uno dentro l'altro, il che rendeva difficile l'analisi per diffrazione. Ciononostante, dopo aver battuto diverse false piste, riuscimmo a stabilire che gli ioni del materiale nero avevano una disposizione cubica, ed erano spaziati lungo ciascuno spigolo a intervalli di circa 0,39 nanometri (miliardesimi di metro). La disposizione era proprio quella di una perovskite.

Fummo allo stesso tempo felici e perplessi: felici perché le perovskiti sono fra le strutture che più ci piace studiare, e perplessi perché non ci eravamo mai imbattuti in una perovskite con un rapporto così basso fra ioni ossigeno e cationi. Una perovskite normale avrebbe dovuto avere nove ioni ossigeno ogni sei cationi ($A_3B_3O_9$, ovvero tre volte ABO_3) e non 6,5. Il rapporto più basso conosciuto, in effetti, era 7,5 ioni ossigeno ogni sei cationi: ci rendemmo conto che questa perovskite superconduttrice avrebbe presentato una struttura insolita, con vari ossigeni mancanti.

L'indizio successivo sulla disposizione degli atomi provenne da una ricerca di effetti di diffrazione da «superstruttura», e cioè figure di diffrazione che possono indicare se la cella elementare è composta da uno o più cubi. Sebbene tutte le perovskiti siano fatte di singole unità a forma di cubo, infatti, molte di esse hanno celle elementari costituite di due o più cubi, ciascuno dei quali ha una composizione o una disposizione degli atomi diversa. La figura di diffrazione che potemmo riconoscere mostrava come l'unità fondamentale che si ripeteva nella struttura del superconduttore nero di Chu fosse formata da tre cubi. Per comodità, parlerò dei cubi nella cella elementare come se fossero impilati l'uno sull'altro, ma essi potrebbero essere disposti orizzontalmente.

Il superconduttore ad alta temperatura denominato 1-2-3 (*cristalli neri*) è stato sintetizzato per la prima volta insieme a una sostanza estranea (*cristalli verdi*). Nel 1987, su richiesta di Ching-Wu (Paul) Chu dell'Università di Houston, che aveva scoperto il materiale, l'autore e i suoi colleghi hanno iniziato il laborioso processo che doveva portare alla separazione delle due sostanze e alla determinazione della loro struttura e composizione chimica.

La struttura del superconduttore 1-2-3 è stata determinata per gradi. I primi studi dimostrarono che la cella elementare, la più piccola unità che si ripete all'infinito nei reticoli dei cristalli, è composta di tre cubi (*a*). Il rame (Cu) occupa le posizioni *B*, il bario (Ba) le posizioni *A* nei cubi esterni, e l'ittrio (Y) la posizione *A* nel cubo di mezzo. Ma dove si trovano gli ossigeni? Studi successivi dimostrarono che 1-2-3 ha due varianti principali, in ognuna delle quali manca l'ossigeno dagli spigoli verticali del cubo con l'ittrio al centro; però la variante più povera d'ossigeno, $YBa_2Cu_3O_6$ (*b*), non ha ossigeni neanche nei piani orizzontali all'estremità superiore e inferiore della cella elementare. Gli ioni rame in questi piani sono coordinati linearmente: ciascuno è strettamente legato a uno ione ossigeno sopra e a uno sotto. L'altro tipo, avente formula $YBa_2Cu_3O_7$ (*c*), è un superconduttore migliore. In esso due ioni ossigeno si trovano nei piani superiore e inferiore, mentre gli ioni rame sono al centro di quadrati formati da quattro ioni ossigeno.

Meno semplice di 1-2-3

I dettagli della struttura cominciarono a prendere forma nella nostra mente (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Ipotizzammo che ioni ittrio e bario, relativamente grandi, occupassero le posizioni *A* e ioni rame le posizioni *B*. Gli effetti di diffrazione da superstruttura suggerivano che il bario, più grande dell'ittrio, fosse al centro dei cubi superiore e inferiore, e che l'ittrio fosse nel cubo di mezzo; tali unità composte da tre cubi Ba-Y-Ba sarebbero state poi impilate l'una sull'altra in tutto il cristallo. Ma dove si trovavano i 6,5 atomi d'ossigeno, e quali posizioni ordinariamente occupate da ossigeno erano invece vuote?

Ulteriori studi mediante diffrazione di raggi X fornirono parte della risposta, anche se con difficoltà. In primo luogo, la diffrazione dei raggi X da parte dell'ossigeno, che è un elemento leggero, è difficile da distinguere nel contesto delle figure di diffrazione molto più intense prodotte dai più pesanti atomi di bario e ittrio. Il nostro compito era anche complicato dalla natura concresciuta dei cristalli e dalla presenza di geminazione anche nei campioni più piccoli. Tuttavia, dopo giorni di faticose misurazioni, cominciò a prender forma un modello.

Trovammo le prove della presenza di atomi d'ossigeno in tutte le posizioni disponibili sui piani orizzontali immediatamente sopra e sotto l'atomo di ittrio, cioè sui piani di separazione con i cubi a corpo centrato dal bario. Per contro, l'ossigeno era chiaramente assente dagli spigoli verticali del cubo con l'ittrio al centro. Stabilito ciò, assegnammo i rimanenti atomi d'ossigeno alle posizioni anioniche che rimanevano «aperte» nei due cubi con il bario, lasciandone circa la metà vuote, in modo che in media ciascuna cella elementare avesse un totale di 6,5 ioni ossigeno.

Alcune settimane più tardi, un gruppo di ricerca dell'Argonne National Laboratory, utilizzando una tecnica che impiegava la diffrazione di neutroni con il metodo delle polveri, riuscì a determinare le posizioni specifiche dei rimanenti atomi d'ossigeno, e dimostrò inoltre che 1-2-3 potrebbe possedere fino a sette atomi d'ossigeno. Di fatto, oggi si sa che l'ossido di ittrio, bario e rame a volte contiene sei atomi d'ossigeno, a volte sette e a volte una frazione intermedia. Evidentemente, sono i tipi più ric-

chi d'ossigeno a essere superconduttori.

Oltre a essere deficiente d'ossigeno, 1-2-3 è una perovskite non comune anche per il fatto che gli atomi di ossigeno vicini ai cationi bario possono, nel tempo, saltare avanti e indietro fra le posizioni anioniche nello stesso piano, alterando la struttura del cristallo. Inoltre la presenza di molte posizioni anioniche vuote permette al materiale di assumere atomi d'ossigeno in più quando il contenuto in ossigeno dell'ambiente aumenta.

Particolarmente interessante è la scoperta che gli ioni rame non sono circondati dalle normali strutture ottaedriche, ma hanno per lo più coordinazione quattro, planare quadrata, o coordinazione cinque, piramidale quadrata: essi sono strettamente legati ai quattro o cinque atomi d'ossigeno che li circondano, i quali formano rispettivamente un quadrato e una piramide a base quadrata. In ambedue le disposizioni, gli atomi di rame giacciono nel piano del quadrato. Dato che 1-2-3 e altri superconduttori ad alta temperatura presentano superconduttività lungo direzioni parallele ai piani del rame, molti teorici pensano attualmente che questa insolita disposizione planare contribuisca alle notevoli proprietà elettriche del materiale. Comunque resta ancora da chiarire come, precisamente, ciò abbia luogo.

A dispetto delle sue caratteristiche uniche, 1-2-3 presenta molte proprietà di altre perovskiti non ideali, come cationi ordinati, atomi d'ossigeno mancanti, stratificazione, geminazione, numerosi difetti puntuali ed errori nell'ordine di impilamento degli strati. Tali deviazioni sottolineano la formidabile sfida rappresentata dalle perovskiti per chiunque tenti di analizzarle o di ottenerne varietà «su misura». Tuttavia, come dimostra in maniera clamorosa la storia dei superconduttori, queste deviazioni forniscono anche una grande opportunità per lo sviluppo di materiali rivoluzionari per l'elettronica.

BIBLIOGRAFIA

JAFFE BERNARD, COOK WILLIAM R., Jr., e JAFFE HANS, *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, Inc., 1971.

GLAZER A. M., *The Classification of Tilted Octahedra in Perovskites* in «Acta Crystallographica», sezione B, parte 11, B28, 15 novembre 1972.

MEGAW HELEN D., *Crystal Structures: A Working Approach*, W. B. Saunders Company, 1973.

YAGI TAKEHIKO, MAO HO-KWANG e BELL PETER M., *Structure and Crystal Chemistry of Perovskite-Type $MgSiO_3$* in «Physics and Chemistry of Minerals», 3, n. 2, 28 agosto 1978.

HAZEN ROBERT M., *The Breakthrough: The Race for the Superconductor*, Summit Books, 1988.

I batteri come organismi pluricellulari

Queste microscopiche forme di vita sono in grado di differenziarsi in vari tipi cellulari e di costituire colonie il cui sviluppo regolarissimo sembra diretto da sistemi di controllo spaziale e temporale estremamente raffinati

di James A. Shapiro

Senza i batteri la vita sulla Terra non potrebbe esistere nella sua forma attuale. Essi infatti rivestono un ruolo importantissimo in molti processi geochimici, fra cui i cicli fondamentali dell'azoto, del carbonio e dello zolfo, che sono indispensabili per la circolazione degli elementi basilari per la vita. Se questi processi dovessero interrompersi, il suolo, l'acqua e l'atmosfera del pianeta diventerebbero inospitali per qualsiasi forma di vita. Eppure, nonostante questa loro fondamentale importanza, si è continuato a pensare ai batteri solo come a semplici microrganismi unicellulari.

Attualmente però alcuni ricercatori stanno mettendo in discussione questo punto di vista, riconoscendo che, sotto molti aspetti, un singolo batterio è più simile a una cellula che fa parte di un organismo pluricellulare che non a un organismo autonomo conducente vita libera: infatti, i batteri formano comunità complesse, «cacciano» in gruppo e secernono «piste» chimiche lungo le quali si spostano migliaia di individui.

Già all'inizio di questo secolo alcuni ricercatori rilevarono che i batteri vivono in comunità nel suolo. L'olandese Martinus Beijerinck scoprì che i batteri appartenenti al genere *Rhizobium* infettano le radici delle leguminose, dove formano strutture pluricellulari organizzate che funzionano come «fabbriche» per la produzione di composti azotati. Più o meno nello stesso periodo, Sergei Winogradsky, che lavorava a Parigi, chiarì il ruolo fondamentale che i batteri rivestono con la loro opera di decomposizione della cellulosa nel ciclo globale del carbonio. Winogradsky fu anche uno dei primi microbiologi a osservare i batteri direttamente nel suolo e rilevò che in questo ambiente pochi di essi si trovano come cellule isolate, mentre la maggior parte forma gruppi che aderiscono alle particelle del suolo. Simili comportamenti di gruppo erano già stati osservati in laboratorio, dove i batteri formavano colonie caratteristiche sulle capsule di Petri oppure aderivano, in forma di popolazioni organizzate, alle pareti delle beute contenenti il liquido colturale.

Nonostante queste osservazioni iniziali, l'immagine dei batteri come organismi unicellulari si è mantenuta nel corso del tempo, probabilmente soprattutto a causa dell'influenza esercitata dalla batteriologia medica. In genere l'identificazione dei microrganismi patogeni viene fatta isolando una singola cellula dell'agente sospetto, ponendola in coltura e dimostrando che la colonia pura ottenuta provoca la malattia in questione. Generalmente non si prende neppure in considerazione la possibilità che le infezioni nel corpo umano coinvolgano aggregati pluricellulari di batteri.

In effetti, molte delle teorie esistenti sulla crescita, la fisiologia e la genetica batterica sono formulate esclusivamente considerando il batterio isolato. Da un punto di vista metodologico questa grande importanza conferita alla singola cellula è strana, visto che in pratica la maggior parte delle ricerche è condotta su popolazioni di cellule. Per esempio, il dosaggio di un enzima può essere effettuato su un estratto di 100 milioni di cellule, ma le conclusioni che se ne traggono spesso partono dall'assunto che tutti i batteri in una popolazione siano più o meno uguali. È vero che tale premessa può semplificare l'interpretazione dei risultati sperimentali, ma probabilmente in molti casi questa semplificazione non è valida. In che misura l'organizzazione pluricellulare nei batteri è eccezionale e in che misura è comune? Nel tentativo di risolvere questo problema sono giunto alla conclusione che la maggior parte dei batteri, forse virtualmente tutti, vive in strutture pluricellulari.

Gli esempi di pluricellularità fra i batteri abbondano: in effetti alcuni dei complessi processi biochimici compiuti dai batteri non potrebbero svolgersi altrettanto efficacemente in assenza di un'organizzazione di gruppo. Il processo della fotosintesi si presta a illustrare questo concetto sotto diversi aspetti. Come le piante verdi, i batteri fotosintetici usano l'energia solare per trasformare l'anidride carbonica in composti organici. I cianobatteri, un gruppo di batteri fotosintetici, spesso crescono dando luogo a catene di cellule collegate tra loro o a viluppi intrecciati; essi contengono una forma di clorofilla e per diversi aspetti assomigliano alle alghe pluricellulari, tanto che per molto tempo sono stati considerati appartenenti al regno vegetale. L'organizzazione pluricellulare agevola l'assorbimento della luce, ma dà anche altri benefici.

Dei batteri fotosintetici, quelli appartenenti al genere *Anabaena* sono tra i meglio conosciuti. Questi batteri, che vivono nelle acque degli stagni, sono capaci sia di compiere la fotosintesi, sia di fissare l'azoto. All'interno di una singola cellula questi due processi biochimici sono incompatibili: infatti l'ossigeno prodotto nel corso della fotosintesi inattiva la nitrogenasi, enzima essenziale per la fissazione dell'azoto. Quando i composti azotati abbondano, *Anabaena* svolge esclusivamente la fotosintesi e i suoi individui sono tutti simili, ma quando la concentrazione di azoto è bassa si formano individui unicellulari specializzati chiamati eterocisti. Essi non contengono clorofilla ma sintetizzano nitrogenasi, un enzima che consente loro di trasformare l'azoto gassoso in forma utilizzabile.

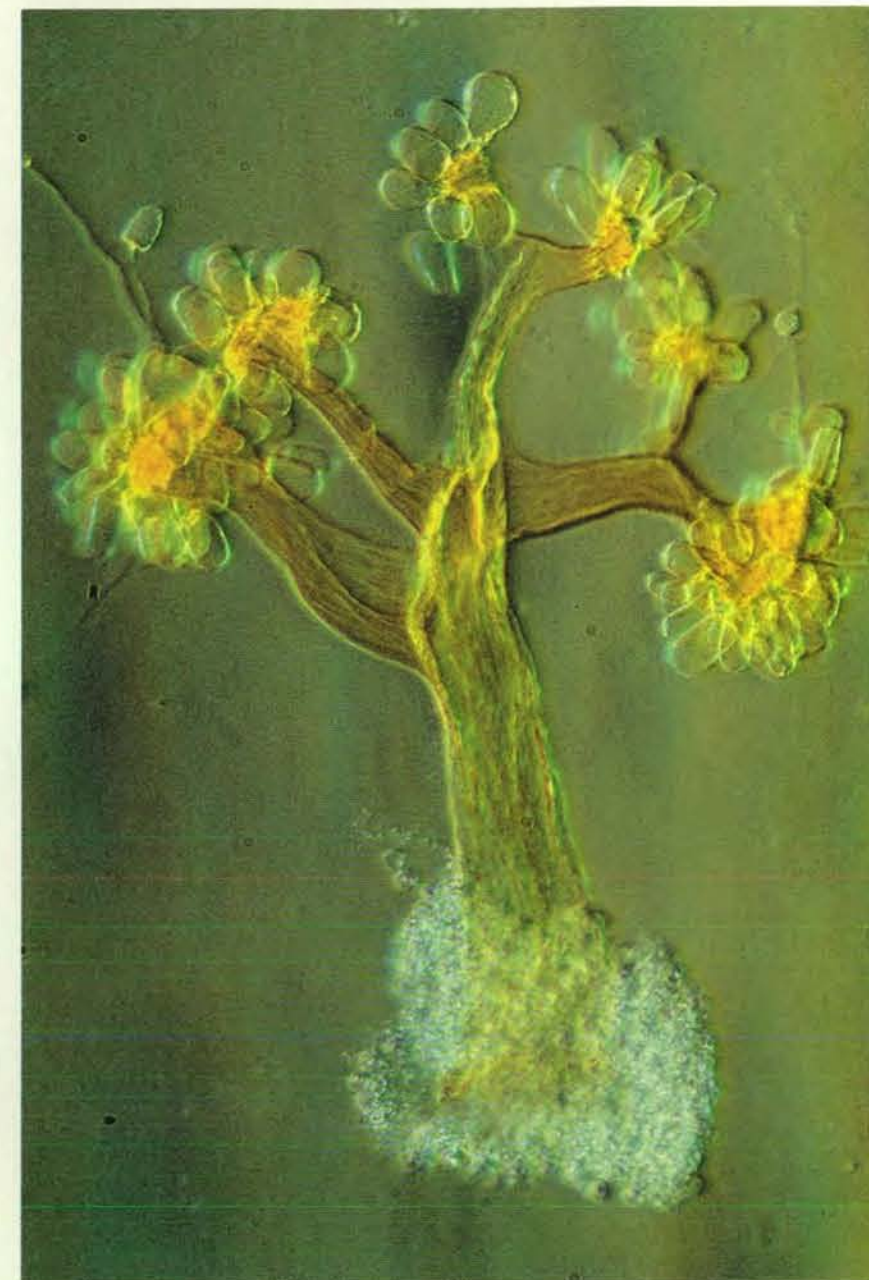
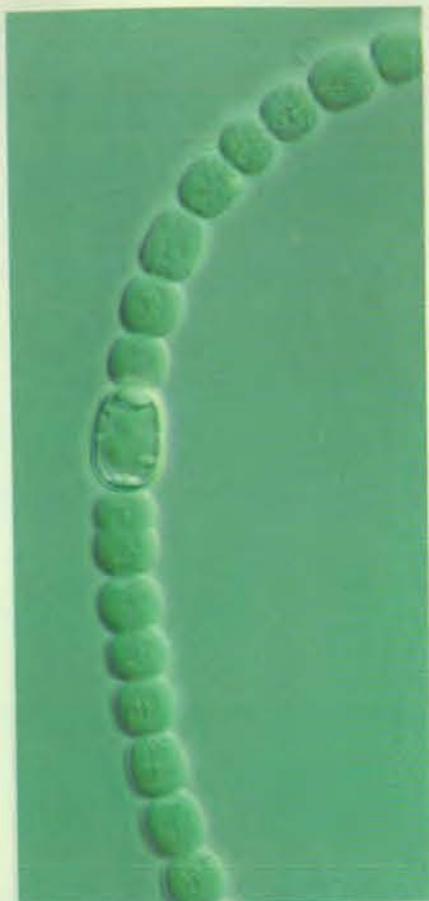
James W. Golden e Robert Haselkorn dell'Università di Chicago hanno dimostrato che in *Anabaena* il differenziamento comprende una sorta di ingegneria genetica controllata. Durante il differenziamento delle eterocisti il DNA si riorganizza in modo specifico dando luogo a una sequenza codificante completa per una delle subunità della nitrogenasi; questa riorganizzazione si effettua solo negli individui che si stanno differenziando per formare le eterocisti. Riorganizzazioni del DNA paragonabili avvengono durante la formazione di cellule specializzate del sistema immunitario dei vertebrati.

Oltre a ciò, all'interno di ciascun filamento di *Anabaena* si trovano canali submicroscopici che collegano i due tipi di cellule. Il trasporto dei prodotti cellulari avviene attraverso questi canali (l'azoto fissato è trasportato verso le cellule fotosintetiche e i prodotti della fotosintesi verso le eterocisti). Quindi, in termini generali, si può dire che *Anabaena* svolge le sue funzioni più come un organismo pluricellulare che come uno unicellulare, in quanto utilizza una ripartizione del lavoro tra i singoli individui per realizzare processi chimici incompatibili e specializzati.

Si possono trovare esempi ancor più spettacolari di comportamento pluricellulare tra i mixobatteri, che dal punto di vista morfologico sono i batteri più complessi esistenti. I loro elaborati corpi fruttiferi emulano quelli dei funghi e dei mixomiceti e da tempo suscitano grande curiosità scientifica. I mixobatteri sono organismi tipicamente sociali e i loro affascinanti, quasi psichedelici, modelli di aggregazione e di movimento sono stati registrati in una bellissima sequenza di fotogrammi realizzata da Hans Reichenbach della Società di ricerche biotecnologiche di Braunschweig e dai suoi collaboratori presso l'Istituto per il documentario scientifico di Göttingen.

A differenza di molti batteri, che periodicamente entrano in fase quiescente sotto forma di singole spore, molti mixobatteri non esistono mai come cellule separate. Al contrario, entrano in una fase quiescente sotto forma di cisti pluricellulari che infine germinano producendo immediatamente una popolazione di migliaia di individui. Da ciascuna cisti si genera una nuova popolazione e, via via che i batteri diventano più numerosi e densi, si verificano diversi sofisticati eventi tipici della condizione di pluricellularità. Vengono secrete piste di muco che segnano il percorso per i movimenti concertati di migliaia di cellule, l'intera popolazione è attraversata da onde ritmiche, flussi di batteri si muovono dal centro ai margini di una colonia in espansione e viceversa e altri batteri si aggregano in particolari zone all'interno della colonia per costituire cisti o, in alcune specie, complessi corpi fruttiferi. Il movimento è altamente coordinato: quando la popolazione si sposta sulla superficie dell'agar si muove come un unico corpo e, se una singola cellula si allontana di alcuni micrometri dal margine, rapidamente ritorna all'interno della colonia come se fosse tirata da un elastico.

Anche le specie di mixobatteri che formano spore costituite da singole cellule conducono vita sociale per la maggior parte del loro ciclo vitale. Per esempio, quando due individui di *Myxococcus virescens* si incontrano, seguono un tipico rituale: si allineano fianco a fianco e si mettono in movimento nella stessa direzione, oppure si strofinano l'uno contro l'altro prima di separarsi. Anche le cellule figlie derivanti da una divisione cellulare mostrano una serie di comportamenti analoga. Questi batteri si mantengono letteralmente in contatto.

Nel mondo dei microrganismi esistono relazioni preda-predatore, proprio come in quello degli organismi superiori. Alcune specie di mixobatteri predatori si nutrono secernendo enzimi che dissolvono la parete cellulare di altri microrganismi; quando la cellula scoppia il batterio ne assorbe il contenuto. La specie *Myxococcus xanthus* ha evoluto un metodo altamente specializzato di cattura della preda adatto all'ambiente acquatico in cui vive: questo batterio non può

Il corpo fruttifero pluricellulare di *Chondromyces crocatus*, un mixobatterio, appare qui ingrandito 268 volte. La struttura è composta da uno stelo centrale che si ramifica formando raggruppamenti specializzati di spore unicellulari. Quando questi grappoli maturano, si aprono e le spore si disperdono e formano nuove colonie. La microfotografia è stata realizzata da Hans Reichenbach della Società di ricerche biotecnologiche di Braunschweig.

Il cianobatterio fotosintetico *Anabaena* forma filamenti pluricellulari in stagni di acqua dolce. La maggior parte degli individui unicellulari svolge la fotosintesi, ma in presenza di basse concentrazioni di azoto si sviluppano cellule specializzate, le eterocisti. Queste ultime, che sono in grado di compiere la fissazione dell'azoto, ma non la fotosintesi, sono più grandi delle cellule fotosintetiche e possiedono speciali granuli per l'immagazzinamento di prodotti azotati. La microfotografia è stata eseguita dall'autore; le cellule sono ingrandite 1625 volte.

liberare nell'acqua i suoi enzimi digestivi perché verrebbero immediatamente diluiti, come peraltro anche le sostanze nutritive contenute nella preda. Jeffrey C. Burnham e colleghi del Medical College of Ohio hanno dimostrato che invece *M. xanthus* costruisce colonie sferiche contenenti milioni di batteri. Le colonie circondano le possibili prede e le intrappolano in «tasche» alla superficie della sfera, dove sia gli enzimi digestivi sia la preda possono essere efficacemente confinati.

Nell'ultimo decennio, presso la Medical School della Stanford University, A. Dale Kaiser e colleghi hanno studiato le basi genetiche della comunicazione e del movimento in *M. xanthus*. Cercando mutanti incapaci di diffondere o di formare corpi fruttiferi, i ricercatori hanno identificato regioni specifiche del DNA del microrganismo che controllano l'aggregazione, la motilità e il differenziamento. In particolare, hanno scoperto che la motilità in questo batterio è controllata da due diversi sistemi. Il sistema *A* (abbreviazione di avventuroso) permette alle singole cellule di muoversi sul substrato; il sistema *S* (abbreviazione di sociale) controlla il movimento di gruppi di cellule. Se uno dei due sistemi è difettoso, le cellule sono ancora in grado di diffondere, ma lo fanno in modo anormale; se entrambi i sistemi sono difettosi, le cellule non possono diffondere affatto. I due sistemi sono sorprendentemente complessi e ciascuno di essi richiede, per essere operativo, una grande quantità di informazione genetica specifica. Una mutazione che colpisca uno qualsiasi di 23 differenti loci genetici eliminerà il sistema di motilità *A*, mentre almeno 10 differenti loci controllano il sistema *S*.

Kaiser e colleghi hanno iniziato a chiarire anche alcuni dei meccanismi con cui le cellule di *M. xanthus* comunicano le une con le altre. Nei loro esperimenti essi combinavano diverse cellule mutanti che mancavano della stessa caratteristica, ma nelle quali tale mancanza era il risultato di mutazioni in loci differenti. Scoprirono così che, quando due mutanti incapaci di muoversi venivano mescolati nella stessa capsula di Petri, riacquistavano la motilità fino a quando venivano mantenuti insieme. Così pure, se due mutanti incapaci di produrre spore venivano mescolati in coltura formavano corpi fruttiferi normali e producevano spore. Si sa che questa complementarità tra cellule mescolate in coltura in alcuni casi è mediata dalla produzione di sostanze extracellulari, mentre in altri può derivare o dal contatto diretto tra le cellule o dalla presenza fisica di due tipi di cellule complementari.

Come spesso accade, cominciai a condurre i miei primi studi sul comportamento pluricellulare nei batteri in seguito a un'osservazione casuale. Circa cinque anni fa, portavo avanti alcuni esperimenti di ingegneria genetica con una tecnica ideata da Malcolm J. Casdaban dell'Università di Chicago e dai suoi studenti allo scopo di studiare l'espressione enzimatica in *Pseudomonas*. Questa tecnica mi consentì di saldare i geni per alcuni enzimi di *Pseudomonas putida* alla sequenza del DNA di *Escherichia coli* che codifica per l'enzima beta-galattosidasi. L'enzima beta-galattosidasi si presta molto bene a essere utilizzato in ingegneria genetica perché alcuni composti chimici cambiano colore quando sono esposti a esso. Se si lega la sequenza per l'enzima beta-galattosidasi al gene che codifica per l'enzima che si vuole studiare, si inserisce il DNA ricombinante ottenuto in *Pseudomonas* e si fa crescere il batterio su agar contenente quei particolari composti chimici, l'intensità e la distribuzione della colorazione forniscono una misura diretta dell'espressione del gene.

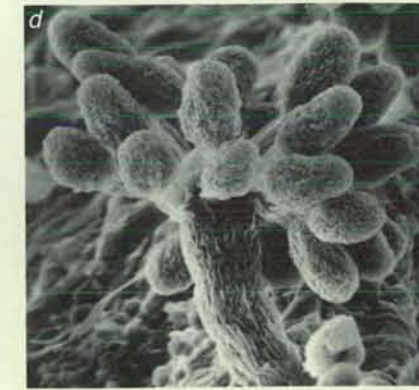
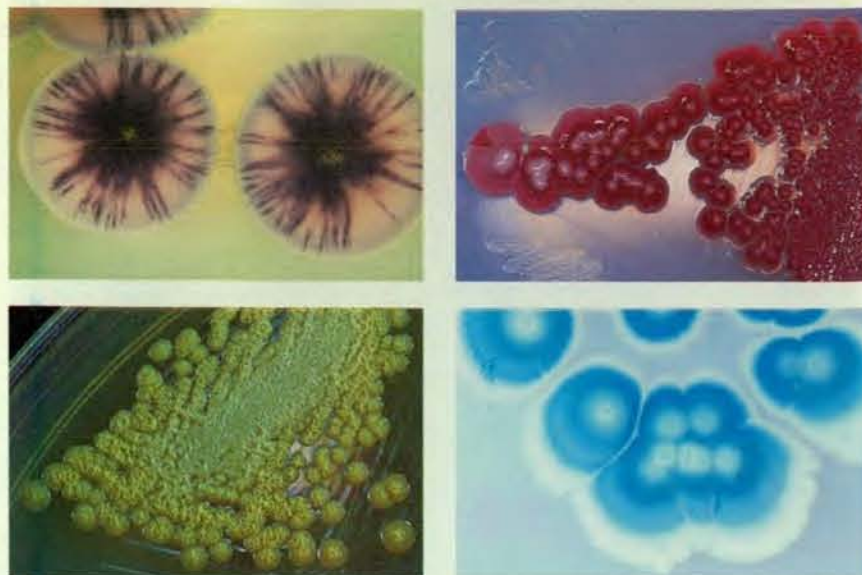
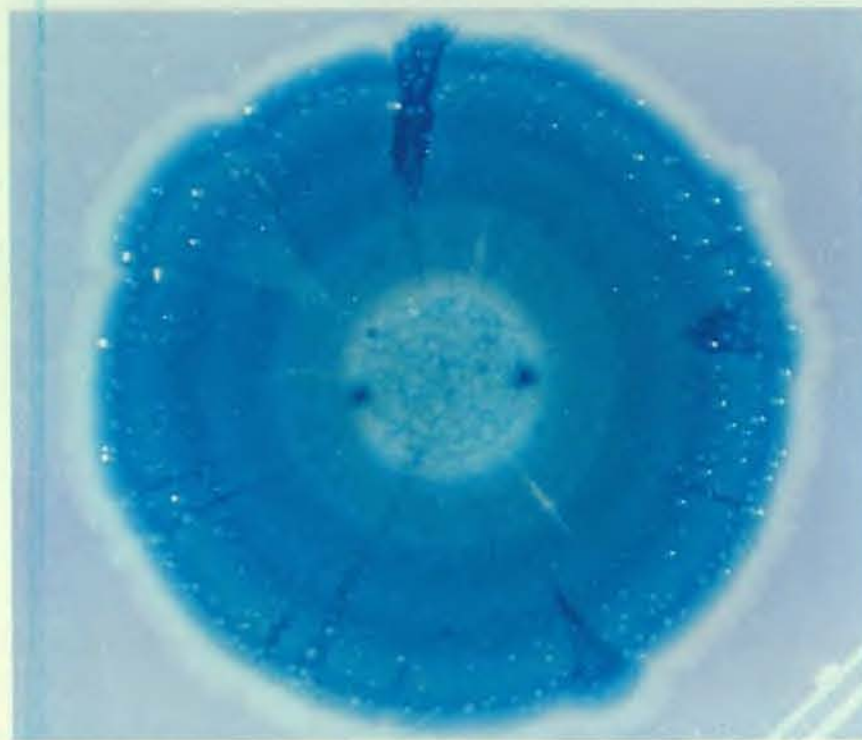
Quando impiantai i miei ceppi ricombinanti di *P. putida* su piastre di agar con indicatore scoprii con sorpresa che ogni colonia mostrava una colorazione con un caratteristico motivo a forma di fiore. Ripetei l'esperimento utilizzando sia *Escherichia coli* manipolata geneticamente sia ceppi di batteri naturalmente pigmentati, come *Pseudomonas cepacia*, *Serratia marcescens* e *Chromobacterium violaceum*, ciascuno dei quali produsse un diverso disegno a forma di fiore. La formazione da parte di differenti ceppi e specie (comprese specie colorate naturalmente e non sottoposte a manipolazione genetica) di colonie caratteristiche mi indusse a credere che la crescita di colonie nei batteri fosse un processo altamente regolato e sottoposto a una qualche forma di controllo temporale. Studi successivi hanno confermato questa ipotesi e mi sembra ora chiaro che l'organizzazione delle colonie segue certe regole generali che aiutano a spiegare l'esistenza di modelli complessivi.

Le colonie tendono ad assumere configurazione circolare e a crescere verso l'esterno a mano a mano che si aggiungono nuove cellule alla periferia. Via via che la colonia cresce, diventa evidente che il modello di crescita consiste di elementi sia concentrici sia radiali. Gli elementi concentrici sono anelli che circondano la colonia, mentre quelli radiali, o settori, hanno l'aspetto di fette di torta. Ogni settore è formato dalla progenie di un'unica cellula, cresciuta dal centro verso la periferia. Alcuni crescono meglio di altri e si espandono, mentre altri settori si limitano a conservare le proprie dimensioni o addirittura scompaiono mentre la colonia si ingrandisce.

In molti casi è possibile selezionare singole cellule da settori differenti, farle crescere in coltura e dimostrare che le cellule appartenenti alla coltura ottenuta da un settore hanno caratteri genetici differenti da quelli di cellule che provengono dalla coltura prodotta da un altro settore; spesso si possono distinguere cellule provenienti da settori diversi sulla base delle differenze nel loro DNA. Recentemente N. Patrick Higgins della Medical School dell'Università dell'Alabama e io abbiamo scoperto che le differenze nel DNA di individui appartenenti a settori e zone concentriche diversi possono essere talvolta visualizzate direttamente filtrando su carta le colonie, estraendone il DNA *in situ* e quindi individuando le sequenze specifiche per mezzo di marcatori radioattivi.

Gli elementi concentrici di una colonia sono meno noti dei settori e perciò

Milioni di singole cellule di *Myxococcus xanthus* formano sfere come mezzo per la cattura di prede in ambiente acquatico. Una preda microscopica, come il cianobatterio *Phormidium luridum* (*nel riquadro*), rimane attaccata alla sfera e infine viene digerita all'interno delle «tasche» sulla superficie della colonia. Le sfere appaiono ingrandite 440 volte nella microfotografia al microscopio elettronico a scansione realizzata da Jeffrey C. Burnham, Susan A. Collart e Barbara W. Highison del Medical College of Ohio.

La formazione di un corpo fruttifero nei mixobatteri avviene attraverso una serie caratteristica di fasi, come mostrano le microfotografie al microscopio elettronico a scansione, che illustrano la morfogenesi di *Stigmatella aurantiaca*. Dapprima le cellule formano centri di aggregazione (*a*). Via via che i batteri si accumulano nei centri, questi si espandono verso l'alto finché lo stelo verticale non è completo (*b*, *c*). In alcune specie, come una non identificata studiata all'Università dell'Indiana (*d*), lo stelo ha complesse ramificazioni. Il corpo fruttifero di *S. aurantiaca* è ingrandito 450 volte. Le microfotografie sono di Gabriela M. Vasquez, Frank Qualls e David White dell'Università dell'Indiana.

Impiantando colture batteriche su agar si ottengono colonie a forma di fiore. Ogni colonia (quando non è troppo affollata) presenta una disposizione caratteristica del particolare ceppo batterico. *Chromobacterium violaceum* (*in alto a sinistra*) produce il pigmento violaceina e forma colonie di color viola. *Serratia marcescens* (*in alto a destra*) sintetizza prodigiosina e forma colonie rosso vivo che un tempo si pensava fossero gocce di sangue. *Pseudomonas cepacia* (*in basso a sinistra*) è gialla e ha una grana superficiale molto particolare, che risulta dall'aggregazione delle cellule alla superficie della colonia. *Escherichia coli* (*in basso a destra*) porta sequenze di DNA manipolate geneticamente che codificano per l'enzima beta-galattosidasi; dove l'enzima si esprime la colonia vira al blu.

Questa colonia di *Escherichia coli* (del diametro di circa un centimetro) si è formata a partire da una goccia di liquido contenente migliaia di cellule. La disposizione complessa e regolare ad anelli pigmentati è tipica di colonie di *E. coli* manipolate geneticamente, colorate per evidenziare l'attività dell'enzima beta-galattosidasi. Si notano settori in cui il controllo della sintesi enzimatica è modificato. I margini curvi dei settori a ore cinque e a ore dieci indicano che i batteri in queste zone proliferano più che nel resto della colonia. I cerchi concentrici appaiono spostati all'esterno nell'attraversare il settore a ore dieci; ciò indica che le variazioni nell'attività enzimatica sono avvenute simultaneamente entro e fuori il settore.

pongono più problemi. Gli individui di una zona concentrica, o anello, condividono una proprietà (come per esempio il grado di espressione dell'attività dell'enzima beta-galattosidasi), ma non discendono da una sola cellula progenitrice: sono direttamente imparentati con i batteri delle zone precedente e successiva, non gli uni con gli altri. Dunque, se l'organizzazione della colonia in zone concentriche diverse non può essere spiegata sulla base dell'ereditarietà, come si può interpretarla? Devono esistere sistemi che conferiscono proprietà comuni ai batteri presenti in un anello e li distinguono dai batteri di un altro anello.

Una serie di indizi sull'origine delle disposizioni concentriche si trova nei modi diversi in cui gli elementi concentrici e radiali interagiscono fra loro. Le fotografie di colonie mostrano spesso che gli anelli concentrici si conservano attraverso settori che crescono più rapidamente del resto della colonia; perciò la disposizione risultante contiene anelli deformati verso l'esterno. Lo stiramento dimostra che gli anelli non si formano sull'agar in posizioni specifiche (cioè a determinate distanze dal centro) ma in momenti ben precisi nel corso dello sviluppo della colonia. Questa osservazione induce a pensare che i batteri possiedano orologi biologici che li rendono capaci di programmare in qualche modo un differenziamento cellulare in momenti specifici dello sviluppo. Anche le pulsazioni ritmiche delle colonie di mixobatteri in crescita riflettono l'azione di un meccanismo «a tempo». Sia gli orologi biologici sia il controllo dello sviluppo nel tempo, precedentemente sconosciuti nei batteri, sono caratteristiche importanti degli organismi superiori.

L'esame della struttura superficiale di una colonia indica che il differenziamento cellulare si sviluppa anche a livello dell'aggregazione. La luce riflessa da una colonia evidenzia diverse strutture superficiali che sono organizzate come i diversi andamenti della pigmentazione e mostrano anch'esse elementi concentrici e radiali. In molti casi i due andamenti coincidono: un settore definito dal colore può mostrare anche una particolare struttura superficiale e un anello può evidenziarsi sia per il suo colore caratteristico, sia per la sua topografia.

Chiaramente l'organizzazione in colonie implica molto più della distribuzione di cellule che presentano solo semplici differenze biochimiche. Per poter studiare i modelli strutturali in modo più preciso, ho fatto ricorso al microscopio elettronico a scansione, che permette altissimi ingrandimenti e grandi profondità di campo. Le microfotografie così ottenute hanno rivelato che le colonie di *P. putida* ed *E. coli* sono costituite da cellule altamente differenziate che spesso formano caratteristici gruppi pluricellulari, i quali coincidono con l'organizzazione macroscopica della colonia; si è visto inoltre che ciascuna colonia secerne materiali extracellulari, alcuni dei quali formano una pellicola o un'«impalcatura» sulla sua superficie.

Questi studi mettevano bene in evidenza che l'attività biochimica all'interno di una colonia batterica è altamente organizzata e delimitata nello spazio: cellule di zone diverse della colonia hanno forme e caratteristiche biochimiche differenti. Per individuare i fattori sconosciuti che controllano la crescita pluricellulare nei batteri, cominciai a studiare le colonie di cellule «sciamanti» che, come indica il nome, crescono rapidamente e coprono una vasta superficie. Queste caratteristiche le rendono ideali per la sperimentazione in laboratorio.

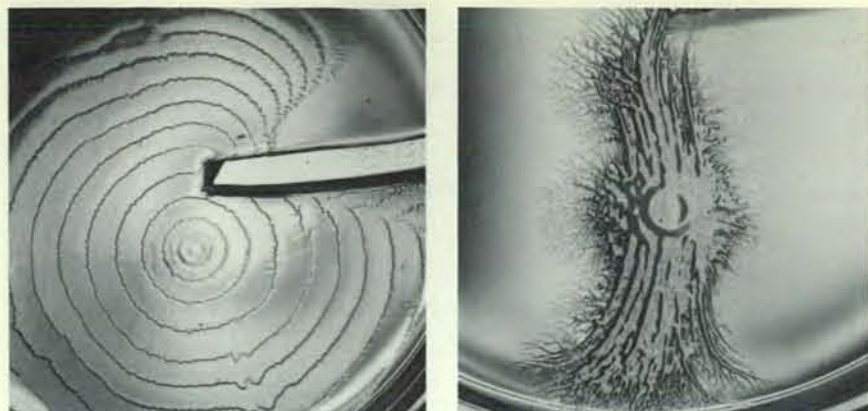
Il comportamento sciamante si può osservare in molte specie di batteri, anche tassonomicamente distanti, e io mi sono soffermato in particolare sulla specie *Proteus mirabilis*. Come il dio greco Proteo, questo batterio si presenta in forme diverse, assumendo nella capsula di Petri configurazioni straordinarie. Nel corso degli anni sono state rilevate nelle colonie di *Proteus* due caratteristiche fondamentali: la presenza in una stessa colonia di almeno due tipi diversi di cellule, cioè lunghe cellule sciamanti coperte da centinaia di flagelli e piccole cellule non sciamanti con pochi flagelli, e lo sviluppo della colonia secondo un processo ritmico strettamente programmato.

Le colonie sciamanti si sviluppano da una popolazione iniziale di piccole cellule non sciamanti: a mano a mano che queste ultime si dividono, cominciano ad apparire le lunghe cellule sciamanti. Esse migrano alla periferia della colonia, dove si riuniscono in gruppi e quindi iniziano l'espansione della colonia spostandosi verso l'esterno con movimenti a mulinello. I flagelli che ricoprono la superficie delle cellule sciamanti ruotano e così facendo conferiscono in qualche modo una spinta al batterio. (È facile capire come i flagelli ruotando permettano a una cellula di muoversi attraverso un liquido, ma come queste delicate strutture siano in grado di far muovere i batteri sulla superficie estremamente viscosa dell'agar resta un mistero.) Osservando al microscopio le colonie sciamanti, si vedono migliaia di flagelli, appartenenti a decine di cellule sciamanti, muoversi in sincronia e formare onde che oscillano mentre le cellule diffondono verso l'esterno a partire dal margine periferico. Questa straordinaria coordinazione indusse Alexander Fleming, lo scopritore della penicillina, a domandarsi in una pubblicazione se *Proteus* avesse per caso un sistema nervoso.

Riprendendo la morfogenesi di *Proteus* con una telecamera a passo uno, sono riuscito a identificare periodicità diverse nella crescita coloniale, confermando così precedenti scoperte di altri ricercatori. Ho trovato che si può osservare un'intensa attività all'interno di una colonia sciamante, sia lungo il margine che avanza, dove le cellule sciamanti si stanno muovendo rapidamente verso l'esterno, sia all'interno del margine, dove continuano la divisione cellulare e la formazione di onde, anche quando le cellule sciamanti non avanzano più. Queste ultime non si espandono indefinitamente, ma si fermano dopo avere percorso una certa distanza e ricominciano a diffondere solo dopo una pausa, che può durare anche alcune ore, a seconda di condizioni quali la temperatura e la composizione dell'agar. Lo sciamare è un'attività strettamente pluricellulare: infatti una singola cellula che risulti separata dal resto della colonia è incapace di avanzare sulla superficie dell'agar, a meno che non sia inglobata da un altro gruppo sciamante; solo da quel momento ricomincia a muoversi.

L'attività entro il perimetro della colonia segue ritmi e periodicità propri, ma è connessa all'espansione della colonia nel suo complesso. Per esempio quando le cellule sciamanti concludono una fase di espansione una serie di onde visibili formate da cellule aggregate più densamente si muove dall'interno della zona di sciamatura verso la periferia. In seguito si osserva un ispessimento della massa di cellule nella zona di recente colonizzazione e un «ribollire» della superficie

Questa fotografia al microscopio elettronico a scansione di una colonia di *Pseudomonas putida* mostra il materiale extracellulare che ne copre la superficie come una pellicola e agevola forse la comunicazione tra le cellule della colonia. Si nota una cellula lunga e curva che attraversa un'apertura nel rivestimento; anche queste cellule potrebbero contribuire alla comunicazione intercellulare nella colonia. L'immagine è ingrandita 2300 volte.

Lunghe cellule sciamanti si osservano al margine di una colonia di *Proteus mirabilis*. Le cellule si preparano a muoversi in gruppo sull'agar; per riuscire a spostarsi fanno ruotare i propri flagelli in sincronia. Esse appaiono ingrandite 600 volte in questa microfotografia realizzata da S. A. Sturdza dell'Istituto Cantacuzino di Bucarest.

La geometria dei mutanti di *Proteus mirabilis* fornisce indizi su come sia controllata la diffusione della colonia. Il mutante illustrato a sinistra forma «terrazze» regolari ripetute in una capsula di Petri di nove centimetri. Se si pratica un solco nell'agar, però, la diffusione si interrompe dopo pochi cicli. L'interruzione della sciamatura nella zona in ombra indica che un segnale chimico deve propagarsi dal centro. La morfogenesi sembra essere sotto il controllo dell'intera colonia e non solo del margine in migrazione. La colonia mutante a destra ha perso la simmetria circolare e mostra un disegno nettamente diverso. All'inizio i batteri hanno formato spesse colonne lungo linee di tensione nell'agar; dopo aver raggiunto determinate dimensioni le colonne si sono ramificate in strutture perpendicolari più piccole, che a loro volta hanno formato diramazioni sottili. Da questo andamento si deduce che il mutante, sebbene abbia perduto la capacità di formare colonie circolari, mantiene una forma di controllo direzionale. La colonia è lunga quattro centimetri circa.

Questa serie di immagini al microscopio elettronico a scansione mostra la morfologia caratteristica di cellule in zone diverse di una colonia di *Escherichia coli*. Dopo 68 ore la colonia, formata da una popolazione iniziale di 100 000 cellule, aveva un diametro di cinque millimetri. Ingrandendo 100 volte il margine esterno (*in basso a sinistra*) si nota un'evidente linea di confine tra due gruppi di cellule differenziate. A ingrandimento maggiore (750 volte) si vede che la zona esterna (*in basso a destra*) è formata da grandi cellule disposte irregolarmente, mentre quella interna ha cellule più piccole raggruppate in schiere quasi parallele.

all'interno della colonia. Questi e altri processi perfettamente sincronizzati successivi alla migrazione producono strutture molto elaborate a forma di terrazze sulla superficie di una colonia sciamante completamente sviluppata.

Osservando la sciamatura mi sono domandato se fosse possibile capire qualcosa riguardo ai sistemi che regolano questo comportamento complesso e regolare. Partendo dal presupposto che spesso nella ricerca biologica si possono ottenere importanti indizi osservando la risposta degli organismi a circostanze anomale, ci si può chiedere in questo caso se, mutate le condizioni nella capsula di Petri, una colonia sciamante potrebbe modificare il suo comportamento.

Due tipi di osservazioni suggeriscono che il comportamento sciamante sia in effetti regolato geneticamente. In primo luogo, quando la sciamatura è interrotta da ostacoli chimici o fisici o da interferenze alla crescita della massa cellulare si notano risposte morfologiche specifiche. Osservando la geometria di colonie sciamanti manipolate artificialmente (o che abbiano subito eventi spontanei che ne deformano i profili regolari) si nota che la crescita della colonia è influenzata da sistemi di controllo sia spaziali sia temporali. In particolare, sembra che la diffusione di sostanze chimiche nell'agar sia molto importante nel dirigere l'espansione della colonia.

Un'altra serie di osservazioni indica l'esistenza di un controllo genetico sulla morfogenesi. In primo luogo, ciascun ceppo di *P. mirabilis* naturalmente isolato mostra uno sviluppo caratteristico delle sue colonie sciamanti. In secondo luogo, si possono ottenere da questi ceppi naturalmente isolati vari mutanti ancora in grado di diffondere, ma con geometrie nettamente differenti da quelle dei loro progenitori. Alcuni mutanti formano «terrazze» di sciamatura periodiche che sono più strettamente spaziate di quelle dei loro progenitori, mentre altri non producono alcuna struttura a terrazza. Una colonia mutante particolarmente strana ha perso del tutto la sua simmetria circolare e cresce con andamento ramificato seguendo linee di tensione presenti nell'agar. Chiaramente i geni che regolano la morfogenesi sono stati alterati in questi mutanti, mentre la capacità di sciamare non è stata eliminata. Non si è ancora riusciti a spiegare dettagliatamente dal punto di vista biochimico come i sistemi di controllo della morfogenesi possano operare in *Proteus* (o anche in *Myxococcus* o in *E. coli*); ciò nonostante, la specificità ereditaria dei fenomeni di sviluppo fa supporre che da questi studi si potrà imparare molto sul coordinamento dei comportamenti di un gran numero di batteri, definendolo sia nello spazio, sia nel tempo.

Negli ultimi vent'anni, con l'accresciuta attenzione ai misteri del comportamento batterico, si è andata affermando l'idea che i batteri siano organismi in grado di «sentire», cioè di ricevere ed elaborare stimoli esterni e rispondervi in modo significativo.

Martin Dworkin dell'Università del Minnesota ha dimostrato di recente in modo chiarissimo la capacità di risposta pluricellulare del microrganismo predatore *Myxococcus xanthus*. Egli ha scoperto che gruppi vaganti di *M. xanthus* percepiscono la presenza di gruppi di batteri di cui si nutrono (o anche di pezzetti di vetro o plastica) su una superficie di agar, compiono brusche svolte in direzione degli oggetti e si muovono quindi direttamente verso di essi. Raggiunti gli oggetti, i gruppi di *Myxococcus* sono in grado di riconoscere se questi siano commestibili o no; nel primo caso se ne nutrono, altrimenti si allontanano per continuare la ricerca. Questo comportamento intenzionale è da sempre stato attribuito solo a organismi superiori.

Il movimento intenzionale di una colonia di *Myxococcus xanthus* è mostrato in questa serie di fotogrammi. In basso si vede una sferetta di lattice, del diametro di cinque micrometri, verso cui si dirige il gruppo di organismi. Dopo 18 minuti la punta della «lingua» formata dai batteri si volge verso la sferetta (*secondo fotogramma*); dopo 33 minuti la raggiunge (*quarto fotogramma*). Dopo aver appurato che la sferetta non è commestibile, i batteri si allontanano. Le immagini sono di Martin Dworkin dell'Università del Minnesota.

Quale può essere eventualmente il valore pratico di queste scoperte? L'industria delle biotecnologie, che si propone di sfruttare batteri manipolati geneticamente per produrre composti biochimici complessi, trarrà senz'altro benefici dal fatto che le cellule batteriche sono specializzate e controllano la sintesi proteica tramite segnali per la comunicazione intercellulare. Una maggiore comprensione dei processi pluricellulari potrà incrementare inoltre l'uso di batteri per rimuovere composti chimici tossici da acque e suoli inquinati. Si potranno anche introdurre caratteristiche pluricellulari per ottimizzare la produttività o migliorare la capacità di specifici ceppi batterici di degradare composti sintetici. Comprendere il comportamento batterico potrà anche rendere più facile controllare la liberazione nell'ambiente di organismi manipolati geneticamente.

Nel campo della medicina una maggiore conoscenza del comportamento batterico potrà portare a un miglioramento nell'efficacia dei trattamenti farmacologici. J. William F. Costerton e colleghi dell'Università di Calgary nell'Alberta (Canada) hanno recentemente descritto il caso di un paziente che soffriva di ricorrenti setticemie poiché una colonia di *Staphylococcus aureus* si era installata sul conduttore del suo *pacemaker* cardiaco. Singole cellule si sarebbero allontanate periodicamente dalla colonia progenitrice producendo le setticemie. Sebbene le singole cellule fossero sensibili alla penicillina, la colonia di per sé era resistente al farmaco: infatti, come molte colonie batteriche, era protetta da un rivestimento di secreto extracellulare. L'unica soluzione per porre termine all'infezione cronica fu rimuovere il *pacemaker* (e la sua colonia).

In altri casi di patogenesi batterica esiste una chiara correlazione tra la tendenza delle cellule ad aggregarsi e la loro capacità di causare un'infezione. Da 25 anni si sa che l'organismo che provoca la gonorrea, *Neisseria gonorrhoeae*, forma tipi diversi di colonie nelle colture di laboratorio; le cellule derivanti da un tipo di colonia sono virulente, mentre quelle derivanti da un altro tipo non lo sono. Dato che il propagarsi di un'infezione richiede che l'organismo patogeno colonizzi l'ospite, suppongo che la patogenesi sia direttamente correlata alla capacità di questo batterio di formare organizzazioni pluricellulari (come risulta evidente dai tipi di colonie che costituisce).

Precursori della moderna batteriologia, come Louis Pasteur, riconobbero che questi minuscoli esseri viventi hanno molto da insegnarci. Oggi sappiamo molto più di allora sulla complessità di questo gruppo di organismi. Se, come ho proposto in questo articolo, i batteri posseggono elaborate capacità di sviluppo e di comportamento tipiche degli organismi superiori, è probabile che una spiegazione dettagliata della capacità di comunicazione di queste piccole cellule potrà influenzare le nostre ipotesi sui processi di elaborazione delle informazioni riguardo a tutti gli organismi.

Benché i batteri siano minuscoli, la loro complessità biochimica, strutturale e di comportamento va oltre le possibilità di descrizione scientifica. Come nell'attuale rivoluzione microelettronica, ha più senso considerare le piccole dimensioni in termini di grande complessità piuttosto che di semplicità. Senza dubbio le conoscenze ottenute studiando le interazioni di miliardi di batteri, che vivono in volumi inferiori a pochi millimetri cubi, ci permetteranno una migliore comprensione di tutte le forme di vita.

BIBLIOGRAFIA

WILLIAMS FRED D. e SCHWARTZHOFF ROBERT H., *Nature of the Swarming Phenomenon in* Proteus in «Annual Review of Microbiology», 32, pp. 101-122, 1978.

ROSENBERG EUGENE (a cura), *Myxobacteria: Development and Cell Interactions*, Springer-Verlag, New York, 1984.

SHAPIRO JAMES A., *Organization of Developing* Escherichia coli *Colonies Viewed by Scanning Electron Microscopy* in «Journal of Bacteriology», 169, n. 1, gennaio 1987.

Le polynja antartiche

Le vaste lacune nella copertura glaciale attorno al continente antartico permettono l'esposizione di enormi superfici marine all'aria fredda, attivando la «macchina termica» costituita dal sistema oceano-atmosfera

di Arnold L. Gordon e Josefino C. Comiso

Durante l'inverno australe (i mesi da giugno a settembre), fino a 20 milioni di chilometri quadrati dell'oceano che circonda l'Antartide (il doppio circa della superficie dell'Europa) rimangono coperti dai ghiacci. Per oltre 200 anni, a partire dai viaggi del capitano James Cook sul finire del XVIII secolo, esploratori, cacciatori di balene e scienziati hanno cartografato da bordo di navi il margine esterno del pack. Tuttavia, eccezion fatta per i rapporti pervenuti dalle poche navi rimaste incolumi dopo essere state intrappolate per un breve periodo nel pack, ben poche cose si sapevano sulla copertura di ghiaccio in sé.

Dal 1973, tuttavia, satelliti equipaggiati con sensori passivi a microonde hanno consentito il rilevamento continuo dallo spazio della copertura di ghiaccio e queste osservazioni hanno condotto i ricercatori a rivedere notevolmente le loro idee sui ghiacci dell'Antartide. Una delle più sorprendenti scoperte dell'«era dei satelliti» sta nell'aver constatato che la copertura di ghiacci non è una distesa continua. In prossimità dei margini vi sono piccole aperture, con dimensioni da uno a 10 chilometri, che vengono chiamate canali. Ancora più sorprendente è che talvolta vaste regioni (con un'estensione fino a 350 000 chilometri quadrati, quindi maggiore della superficie dell'Italia) risultano completamente libere da ghiaccio.

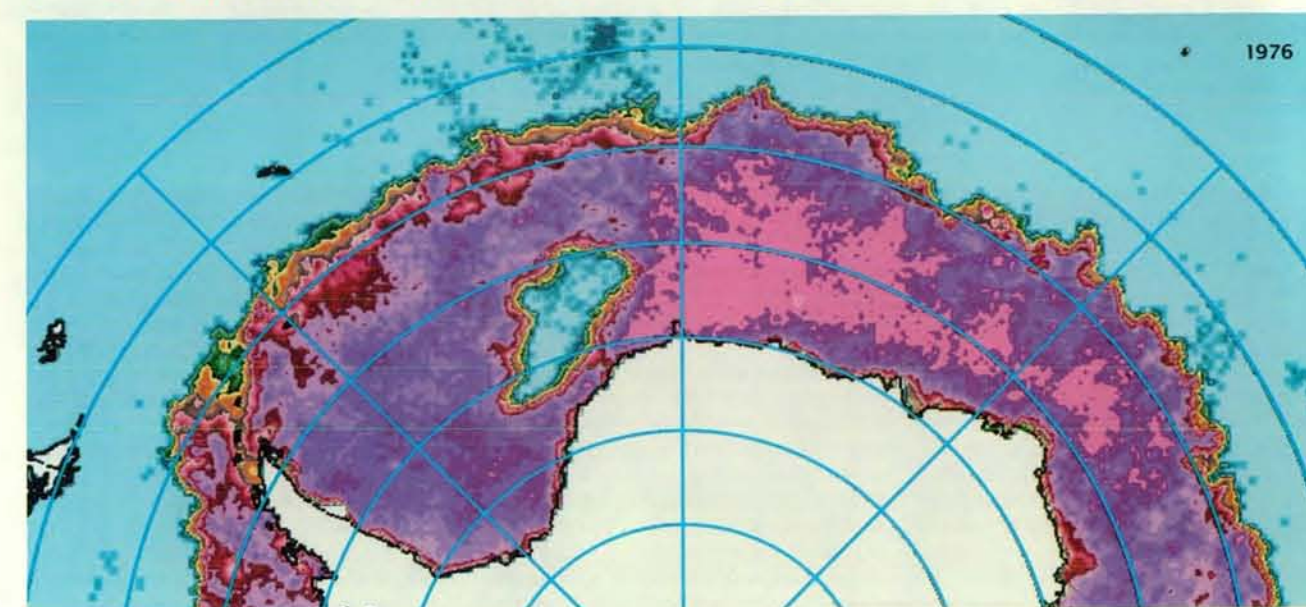
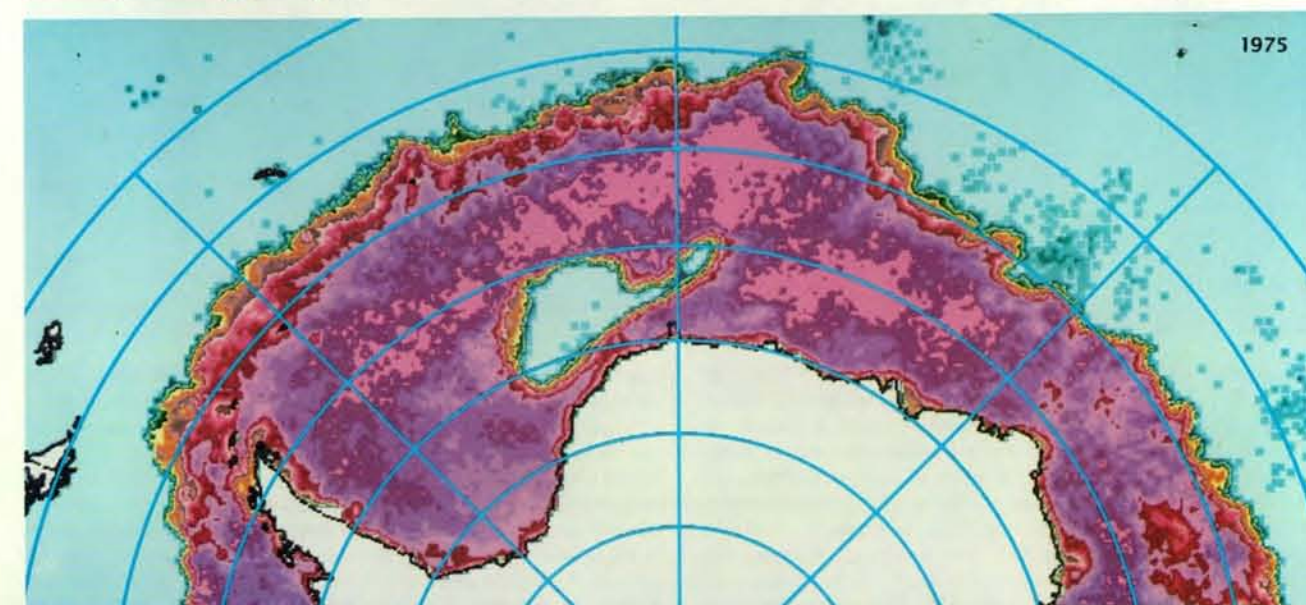
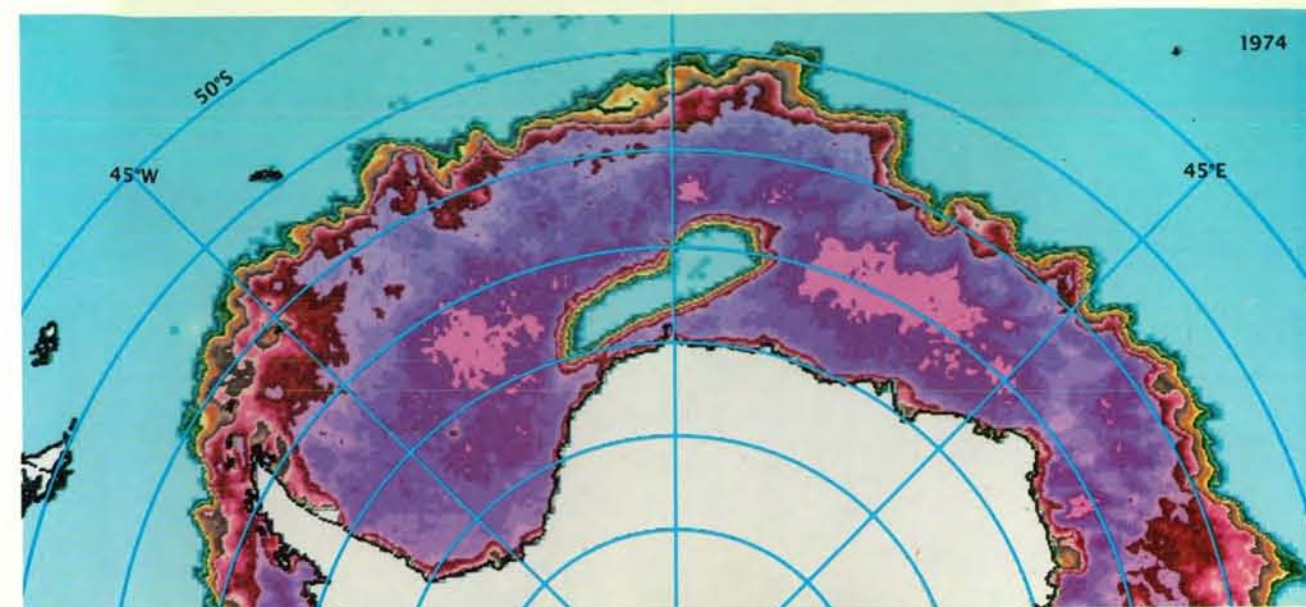
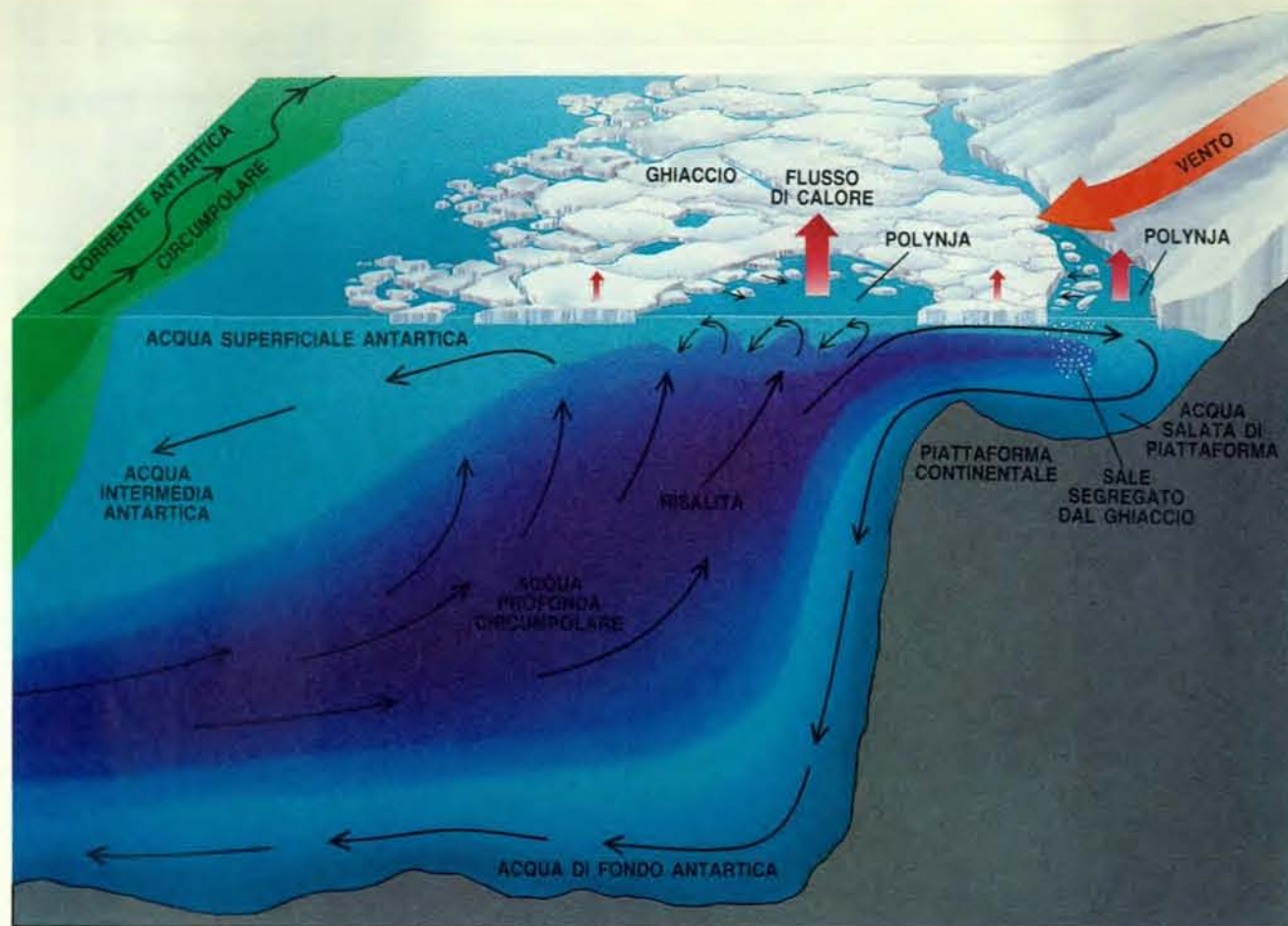
In queste regioni, note con il termine russo «polynja», le acque superficiali dell'Oceano Antartico sono esposte alla rigida atmosfera polare. Le polynja e gli effetti a esse correlati non sono ancora ben noti, tuttavia è ora evidente che sono la conseguenza dell'intensa interazione tra oceano e atmosfera che ha luogo intorno all'Antartide e che a loro volta partecipano significativamente a questa interazione. Gli scambi di energia, acqua e gas atmosferici che si hanno intorno all'Antartide tra l'oceano e l'atmosfera hanno un ruolo dominante nella determinazione su grande scala dei movimenti, della temperatura e della composizione chimica dell'atmosfera e degli oceani su tutta la Terra. Le polynja accelerano questi processi esponendo direttamente all'atmosfera vaste superfici dell'Oceano Antartico.

Esistono due tipi fondamentali di polynja: quelle costiere e quelle di oceano aperto. Le polynja costiere si sviluppano quando forti venti locali, spirando dal continente antartico, spingono il ghiaccio verso il largo a mano a mano che questo si forma, lasciando un'area sgombra da ghiaccio tra la costa e il pack situato più al largo. Già prima che fossero disponibili i dati da satellite, i ricercatori erano al corrente dell'esistenza delle polynja costiere. Essi rimasero tuttavia assai sorpresi nell'apprendere attraverso le osservazioni da satellite quanto siano comuni le polynja costiere e quali possano essere le loro dimensioni. (In qualche polynja costiera la distanza dalla costa al margine del pack arriva fino a 50 o anche 100 chilometri.)

Le polynja di oceano aperto si formano «nel corpo» della copertura di ghiaccio, lontano dalla costa. Alcune di queste polynja sono di gran lunga le più vaste e le più durature. Non è ancora completamente chiaro quali forze generino e mantengano le polynja di oceano aperto, ma le informazioni da satellite e da navi, raccolte da noi e da altri ricercatori, mettono in grado gli oceanografi di formulare ipotesi ragionevoli.

Al fine di comprendere quali siano le forze specifiche che generano e mantengono le polynja e gli effetti che queste possono produrre occorre prima rendersi conto del ruolo che l'Oceano Antartico svolge nella circolazione oceanica generale e sul clima del nostro pianeta nel suo complesso. Dato che l'Oceano Antartico comunica estesamente con gli altri oceani, oltre a essere molto più vasto della zona oceanica che circonda la regione artica esso «pesa» molto più di quest'ultima nella circolazione oceanica globale.

Quando la radiazione solare riscalda le acque oceaniche delle zone tropicali e subtropicali, una parte di quel calore diffonde verso il basso in acque più profonde. Il calore solare provoca anche tassi di evaporazione relativamente alti, il che fa aumentare la salinità delle acque superficiali. L'eccesso di sale, come il calore, diffonde verso il basso. Il riscaldamento e l'aumento di salinità nelle acque profonde vengono intensificati dal miscelamento che avviene nell'Atlantico settentrionale, in cui l'acqua di superficie, relativamente calda e ad alta salinità, viene rimescolata in profondità. La massa d'acqua risultante, calda e salata, si espande gradualmente verso l'Oceano Antartico. Nella zona circumantartica quest'acqua, che è chiamata «acqua pro-

La polynja di Weddell, un'enorme regione libera dai ghiacci in mezzo al pack nel Mare di Weddell, si è formata per tre inverni australi consecutivi. In queste immagini da satellite, del settembre 1974 (*in alto*), 1975 (*al centro*) e 1976 (*in basso*), l'area in bianco rappresenta il continente antartico mentre le regioni in colore sono aree oceaniche ricoperte in diversa misura da ghiacci marini. Le zone quasi completamente ricoperte sono in viola e rosa, quelle libere in blu chiaro. In estate la polynja scompariva con lo scioglimento dei ghiacci. Ai suoi massimi la polynja misurava circa 350 per 1000 chilometri. Se ne sono potuti rilevare gli effetti sulla temperatura delle acque sottostanti fino a ben 2500 metri di profondità.

L'andamento della circolazione nell'Oceano Antartico è dominato dalla risalita di acque relativamente calde e salate («acqua profonda circumpolare») e dalla trasformazione di queste in «acqua superficiale antartica». Quest'ultima poi si immerge dando luogo all'«acqua intermedia antartica» e infine all'«acqua di fondo antartica». La circolazione è alimentata dal vento e dallo scambio di calore e acqua dolce tra oceano e atmosfera. L'acqua che risale viene convertita in acqua di superficie, fredda e relativamente dolce (essa cede infatti calore all'atmosfera e riceve acqua dolce dalle precipitazioni e dalla fusione del ghiaccio). Una parte dell'acqua superficiale si muove verso nord e affonda gradualmente, contribuendo alla formazione dell'acqua intermedia antartica. Un'altra frazione dell'acqua superficiale si dirige invece verso il polo; alla fine si inabissa e rifluisce all'indietro verso nord, dando luogo all'acqua di fondo antartica. La circolazione è influenzata dalle polynja. Nelle polynja di oceano aperto (*al centro*) il calore si disperde nell'atmosfera molto rapidamente, non essendovi l'isolamento termico dato dalla copertura di ghiacci. Le correnti convettive, in cui l'acqua calda risale a mano a mano che quella fredda affonda, accelerano il trasporto di acqua relativamente calda verso la superficie. Le cosiddette polynja costiere (*a destra*) si formano quando il ghiaccio viene allontanato dalle coste a opera dei venti via via che si forma. La superficie di acqua libera che così viene prodotta perde rapidamente calore, mentre il sale liberato nel processo di congelamento va ad accrescere la densità delle acque superficiali accelerando la formazione dell'acqua di fondo antartica.

fonda circumpolare» risale verso la superficie. Qui essa disperde calore nell'atmosfera, si raffredda e, aumentando la densità, si inabissa verso il fondo. Questa «acqua di fondo antartica» scorre presso il fondo oceanico verso nord oltrepassando anche l'equatore. Essa costituisce la maggiore corrente di profondità del pianeta. A mano a mano che l'acqua si sposta a nord, si rimescola verso l'alto, cosicché il ciclo di riscaldamento e raffreddamento può ricominciare.

L'Oceano Antartico è quindi una parte di quell'enorme «macchina termica» che imprime movimento a gran parte delle acque oceaniche. Oltre a ciò, il massiccio ricambio di acqua che si verifica nella regione antartica dà luogo a un meccanismo con il quale la chimica dell'atmosfera può influenzare quella dell'oceano e viceversa. Il ricambio, da un canto, ossigena il fondo dell'oceano: l'acqua che arriva in superficie e raggiunge l'equilibrio con la temperatura e la composizione dell'atmosfera viene successivamente risospinta in profondità. Il processo raffredda le acque profonde, abbassa la loro salinità e soprattutto ristabilisce il livello d'ossigeno, depauperato dagli organismi viventi. Il ricambio delle acque profonde può anche essere importante nello stabilire un equilibrio, per quanto approssimativo, tra la concentrazione nell'oceano dei gas disciolti, come l'anidride carbonica, e il livello di questi nell'atmosfera. Quindi il ricambio è un fattore di rilievo in fenomeni globali come il riscaldamento per «effetto serra» che ha luogo all'aumentare del livello di anidride carbonica nell'atmosfera.

Gli effetti della macchina termica non si fermano qui. Il tasso totale di trasporto del calore dall'equatore ai poli determina globalmente la variazione della temperatura con la latitudine. A sua volta questo fenomeno ha un ruolo nel dirigere molti dei processi che governano lo stato del tempo e il clima della Terra.

Forse le forze più importanti che provocano il ricambio nell'Oceano Antartico sono la spinta idrostatica e i venti. La prima determina la stratificazione dell'oceano, per cui le masse d'acqua si sovrappongono a seconda della loro densità (a sua volta determinata dalla temperatura e dalla salinità). I venti d'altro canto tendono a perturbare questa stratificazione. Inoltre lo scambio di calore e di acqua (per evaporazione) tra superficie e atmosfera altera la densità delle acque superficiali e può favorire correnti convettive (l'acqua meno densa risale mentre le acque più fredde e saline si inabissano) che conducono a un ristabilirsi della stratificazione.

Lo strato superficiale d'acqua dell'Oceano Antartico, esteso fino alla profondità di circa 100 metri, si chiama «acqua superficiale antartica». Quest'acqua è fredda, trovandosi a contatto con la gelida atmosfera antartica, e relativamente dolce, poiché in questa zona sia le precipitazioni, sia lo scioglimento dei ghiacci prevalgono sugli effetti della debole evaporazione.

Poco più a nord del circolo polare antartico (a 65 gradi di latitudine), i venti dominanti spingono le acque superficiali verso nord, allontanandole dal polo, mentre a sud di quella latitudine altri venti spingono l'acqua superficiale in senso opposto, verso il polo. La divergenza che ne risulta, attorno alla latitudine di 65 gradi sud, provoca la risalita di acque profonde: queste rimpiazzano le acque spostate a nord o a sud dai venti. L'effetto è quindi di portare in superficie le acque relativamente più calde e salate che stanno sotto le acque superficiali antartiche per «convertirle» a loro volta in acque superficiali antartiche.

A fornire queste acque più calde è la cosiddetta acqua profonda circumpolare che è richiamata nell'Oceano Antartico in parte dai fenomeni di risalita legati al vento. Benché quest'acqua circumpolare (che si estende approssimativamente fino a 2000 metri di profondità) sia più calda di quella superficiale, essa è lievemente più densa, essendo un po' più salina. Per questo essa tende a rimanere sotto le acque superficiali.

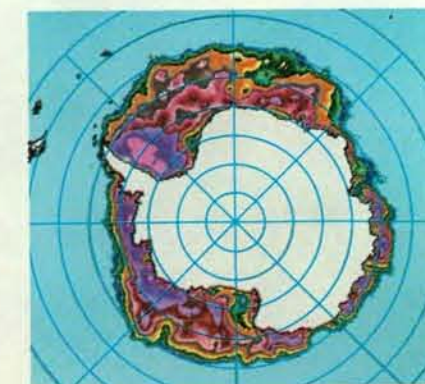
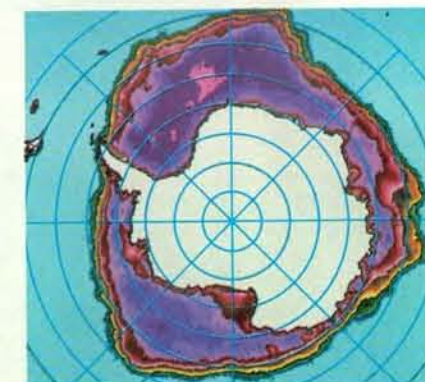
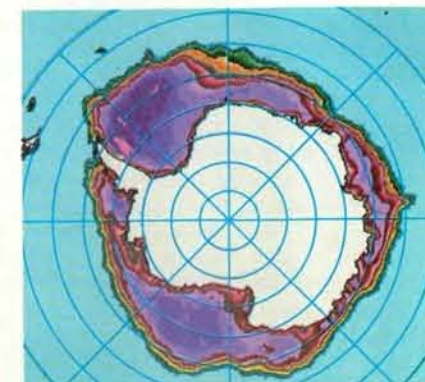
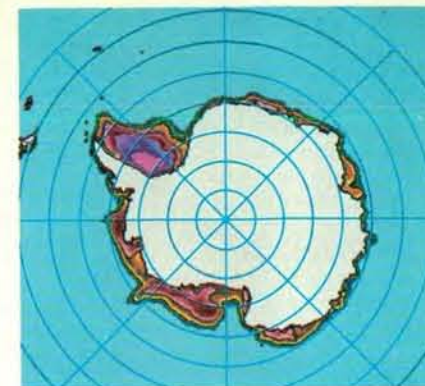
Nondimeno le acque superficiali e quelle profonde, a sud di 60 gradi di latitudine circa, sono così simili per densità che la loro stratificazione è appena stabile. Forze di minima entità la possono perturbare. Queste possono essere date dal vento e da variazioni della salinità nello strato superficiale. Forti venti possono favorire il rimescolamento tra i due strati, in particolare se sono presenti lastroni di ghiaccio che aumentano la turbolenza. Anche la formazione del ghiaccio marino durante l'inverno ha un ruolo in questo mescolamento: quando l'acqua di mare gela, i cristalli di ghiaccio espellono la maggior parte del sale sotto forma di una salamoia che accresce la salinità (quindi la densità) delle acque superficiali a contatto con il ghiaccio; queste si mescoleranno quindi più facilmente con le acque sottostanti.

Quando, a seguito di questo processo, l'acqua profonda circumpolare si rimescola e sale in superficie, cede calore all'atmosfera e si raffredda, diventando più densa. Al tempo stesso grandi masse di acqua superficiale continuano a essere spostate dai venti dominanti, sia verso il polo, sia in senso opposto. La parte in movimento verso il polo diventa via via più densa, a mano a mano che si mescola con la salamoia prodottasi in seguito alla formazione di nuovo ghiaccio. Quando quest'acqua superficiale raggiunge la piattaforma continentale antartica, si inabissa, rifluendo lungo la scarpata continentale verso il fondo dell'oceano e dando luogo all'acqua di fondo antartica. In questo modo gli effetti idrostatici e del vento si combinano per trasportare acqua calda di profondità da nord, trasferirne il calore all'atmosfera antartica e risospingerla quindi verso il fondo oceanico.

Sebbene la formazione della coltre di ghiaccio contribuisca ad accelerare questa macchina termica, paradossalmente la stessa presenza del ghiaccio tende a impedire il ricambio d'acqua con l'oceano profondo. La copertura di ghiaccio isola termicamente la superficie dell'oceano, ostacolando la cessione di calore da questa all'atmosfera. Anche se una piccola quantità di calore riesce a passare all'atmosfera attraverso il ghiaccio, la conduzione non è paragonabile a quella che si avrebbe con un'esposizione diretta dell'acqua all'atmosfera: uno strato di ghiaccio di circa un metro (quindi poco più spesso di gran parte della copertura glaciale intorno all'Antartide) può ridurre durante l'inverno la cessione di calore dell'oceano di un fattore da 10 a 100.

Come vengono influenzati questi processi dalle polynja, dove il ghiaccio presenta lacune? Sarebbe impossibile rispondere a questa domanda senza i dati da satellite. Le osservazioni da satellite forniscono coperture complete, ripetute e continuative, permettendo ai ricercatori di seguire variazioni di breve periodo, comprese nell'arco di una settimana o addirittura di un solo giorno.

I sensori su satellite possono operare a differenti lunghezze d'onda e in modi diversi. Il sensore che più si è dimostrato versatile e adatto per osservazioni sulle regioni polari è il radiometro passivo a microonde, che rileva l'energia irradiata naturalmente da varie sostanze a lunghezze d'onda comprese tra un millimetro e un metro. La radiazione viene emessa tanto nei periodi di buio quanto in quelli di luce e riesce ad attraversare le nubi, cosicché è possibile eseguire osservazioni a qualunque ora e con qualunque tempo atmosferico. Il radiometro a microonde è ideale per rilevare con continuità la copertura di ghiaccio, poiché per alcune lunghezze d'onda nell'ambito delle microonde l'emissività dell'acqua e del ghiaccio è molto differente.

La quantità di energia irradiata a una data lunghezza d'onda da una superficie marina ghiacciata dipende da numerose variabili, ivi comprese temperatura e

L'estensione della copertura di ghiacci marini nella regione antartica varia stagionalmente. Queste immagini da satellite sono state ottenute (*dall'alto in basso*) in marzo, giugno, settembre e dicembre 1984 e cioè nell'estate, autunno, inverno e primavera australi. In estate i ghiacci ricoprono circa quattro milioni di chilometri quadrati di oceano; d'inverno circa 20 milioni.

spessore del ghiaccio, presenza di copertura nevosa e salinità. Eseguendo simultaneamente rilevamenti a numerose lunghezze d'onda è possibile eliminare l'influenza di questi fattori e ricavare una buona stima della copertura totale di ghiaccio in una data regione. Inoltre, combinando le osservazioni eseguite alle diverse lunghezze d'onda, si possono ricavare vari altri parametri fisici, come la temperatura del ghiaccio e della superficie marina, la quantità di vapore acqueo nell'atmosfera, la posizione del margine dei ghiacci e perfino la velocità del vento sopra l'oceano.

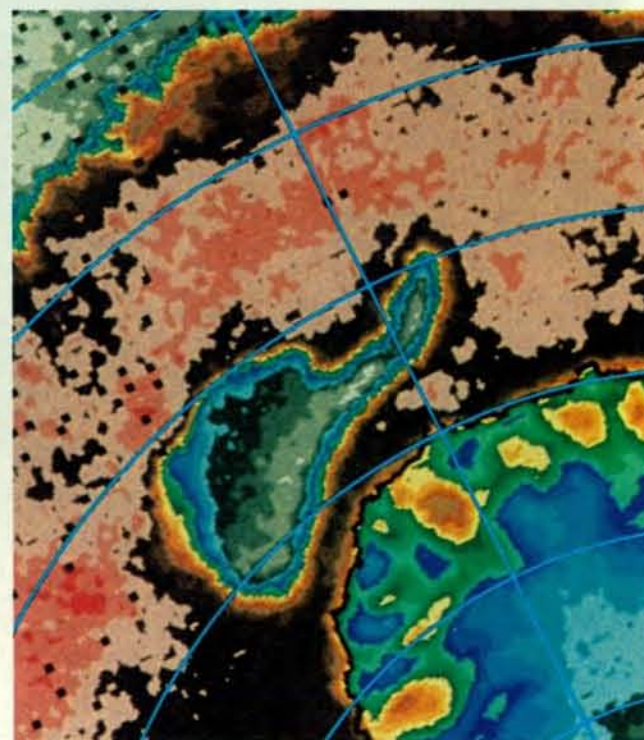
Il primo sensore passivo a microonde portato nello spazio è stato l'Electrically Scanning Microwave Radiometer, a bordo del satellite *Nimbus 5*, messo in orbita nel dicembre 1972. Questo radiometro, che misurava la radiazione solo in una frequenza, trasmise buoni dati per circa quattro anni. In seguito i ricercatori utilizzarono un radiometro multicanale, lo Scanning Multichannel Microwave Radiometer, a bordo di *Nimbus 7*. Questo strumento, in grado di registrare l'intensità e la polarizzazione della radiazione a cinque frequenze distinte, fu operativo dal 1978 al 1987, anno nel quale venne disattivato per irregolarità di orientazione del satellite. Nel 1987 un nuovo sensore, lo Special Sensor Microwave Imager, venne messo in orbita nell'ambito del Defense Meteorological Satellite Program, assicurando così una copertura continua mediante satellite di tutto l'Oceano Antartico.

La scoperta dell'esistenza e dell'estensione delle polynja è tra i più interessanti risultati delle osservazioni da satellite sull'Antartide. Come già si è detto, esistono due tipi di polynja, le costiere e quelle di oceano aperto. I dati da satellite, le osservazioni dalle navi e le analisi teoriche hanno mostrato che i due tipi di polynja prendono origine da cause molto differenti e hanno a loro volta effetti del tutto dissimili nel ricambio delle acque profonde.

Le polynja costiere sono essenzialmente «fabbriche» di ghiaccio marino. Esse compaiono quando i venti locali spingono il nuovo ghiaccio marino lontano dal continente via via che si forma. Questo fenomeno espone all'atmosfera una superficie di acqua libera sulla quale può formarsi altro ghiaccio, continuando così il processo. Le polynja costiere si chiamano anche polynja «a calore latente», dato che il calore che esse cedono all'atmosfera è soprattutto sotto forma di quel calore latente che l'acqua liquida libera ghiacciando a temperatura costante. Si pensa che il flusso di calore verso l'atmosfera dovuto alle polynja a calore latente corrisponda a più di 300 watt al metro quadrato, abbastanza da provocare giornalmente nelle zone costiere la formazione di uno strato di ghiaccio spesso 10 centimetri (successivamente rimosso dal vento). Gran parte del ghiaccio marino presente negli oceani adiacenti viene probabilmente generato nelle polynja a calore latente.

Intanto, a mano a mano che si forma il ghiaccio nella polynja, la salamoia che si separa da esso fa sì che la salinità delle acque soprastanti la piattaforma continentale aumenti e favorisce la formazione dell'acqua di fondo antartica. In base a calcoli approssimativi sui dati dei satelliti, si può valutare che la formazione del ghiaccio nelle polynja costiere rilasci una quantità di sale sufficiente a generare acqua di fondo in ragione di 10 milioni di metri cubi al secondo.

L'enorme scala dei fenomeni che hanno origine nelle polynja costiere (produzione di ghiaccio, raffreddamento dell'oceano e aumento di salinità delle acque di fondo) lasciò assai sorpresi gli oceanografi quando venne valutata per la prima volta dai dati da satellite. La conoscenza che abbiamo acquisito sulle polynja costiere contribuisce a spiegare molte particolarità dell'Oceano Antartico in precedenza enigmatiche, come l'alta salinità delle acque sovrastanti la piattaforma continentale (che era stata misurata durante le estati australi) e la grande quantità di acqua di fondo che dall'Oceano Antartico fluisce verso gli altri oceani.

Le immagini da satellite della polynja di Weddell, ottenute nell'agosto 1975, illustrano i vantaggi del rilievo passivo nelle microonde (*a destra*) rispetto ai rilievi convenzionali nell'infrarosso (*a sinistra*). Nell'immagine nell'infrarosso la polynja è visibile come una zona scura al centro, ma la copertura di nubi rende impossibile determinarne l'estensione. Nell'immagine nelle microonde è invece possibile non soltanto determinare con esattezza la forma della polynja ma anche identificare importanti particolarità, come il limite tra copertura di ghiacci e oceano libero (*confine tra blu e grigio, in alto a sinistra*) nonché il bordo della massa continentale (*margine arancione, in basso a destra*). I vari colori dell'immagine rappresentano la «luminosità» della radiazione di microonde emessa dai vari materiali presenti sulla superficie terrestre. Il bianco e il grigio indicano le emissioni più deboli, corrispondenti a zone di acqua libera.

La polynja del Cosmonauta, nel mare omonimo, a circa 65 gradi di latitudine sud e 45 gradi di longitudine est, evidenzia una zona di oceano in cui spesso appaiono polynja. Il fatto che certe zone ben localizzate siano di frequente sedi di polynja o di aree con scarsa copertura di ghiaccio avvalora la teoria in base alla quale la topografia del fondo oceanico influenzerebbe la formazione delle polynja. L'immagine è stata ottenuta nel settembre 1986.

Le forze che originano e mantengono le polynja di oceano aperto sono alquanto più complesse di quelle che riguardano le polynja costiere. Le polynja di oceano aperto si formano probabilmente per l'instaurarsi di celle convettive, ovvero di un meccanismo di circolazione verticale (su una superficie avente una sezione di pochi chilometri) in cui acqua relativamente calda (in questo caso acqua profonda circumpolare) sale in superficie, si raffredda e quindi affonda, rimpiazzata da altra acqua che risale a sua volta. Nelle polynja di oceano aperto le acque calde che risalgono con continuità sono in grado di fondere il ghiaccio in superficie e di impedirne la riformazione. Le polynja di oceano aperto sono dette anche «a calore sensibile» perché il processo con cui cedono calore è direttamente legato a variazioni di temperatura ed è quindi rilevabile.

Dato che la stratificazione delle acque nell'Oceano Antartico è solo limitatamente stabile, si possono formare celle di convezione isolate in molti punti al di sotto del ghiaccio marino. Come mai solo alcune di queste danno origine a polynja? La risposta ha a che vedere con la scala dimensionale del fenomeno. Se la convezione viene innescata sotto una copertura di ghiaccio, il flusso iniziale di calore che risale in superficie fonde, se non tutto, almeno una buona parte del ghiaccio sovrastante la cella. Questo genera un sottile strato di acqua dolce in superficie. L'acqua dolce è meno densa dell'acqua sottostante (relativamente più calda, ma salata) perciò rimane stabilmente in superficie e la convezione si blocca, perché l'acqua calda non può più arrivare in superficie. Anche se questo straterello iniziale di acqua dolce non fosse sufficiente a bloccare la convezione, altre porzioni di ghiaccio possono affluire nella polynja e fondere, dando luogo a una quantità di acqua dolce sufficiente ad arrestare la convezione.

Se la polynja avesse fin dall'inizio una grande estensione, però, sarebbe in grado di automantenersi. L'area di una polynja entro cui si verifica la convezione è proporzionale al quadrato del suo raggio. La quantità di ghiaccio che può entrare nella polynja è proporzionale al perimetro, che a sua volta è direttamente proporzionale al raggio. Così se una polynja ha raggio al di sopra di un certo valore minimo, il ghiaccio non può affluire tanto rapidamente da bloccare la convezione e di conseguenza la polynja può sopravvivere.

La dinamica dei fluidi nella Terra in rotazione impone che le celle convettive nell'Oceano Antartico non possano avere diametro maggiore di 10-30 chilometri circa. Una polynja di dimensioni maggiori in grado di automantenersi dovrebbe probabilmente insistere su un certo numero di celle convettive disposte «fianco a fianco».

Le polynja a calore sensibile danno luogo a parecchi effetti di rilievo. Anzitutto le celle di convezione portano in superficie le acque profonde circumpolari relativamente calde, accelerando così il processo di trasferimento del calore nell'atmosfera. Non si sa ancora quanto sia importante questo effetto nell'azione complessiva della macchina termica globale, non essendo noto se le grandi polynja si formino con frequenza sufficiente per avere un peso sul clima. L'effetto potrebbe comunque essere sostanziale, dal momento che l'oceano cede assai più efficacemente calore dalla superficie libera che attraverso il ghiaccio.

Queste polynja promuovono anche interazioni chimiche tra atmosfera e oceano. Diversamente dall'acqua coperta dal pack, l'acqua libera di una polynja può scambiare con relativa facilità gas con l'atmosfera, assorbendone alcuni o rilasciandone altri prima di riinabissarsi. Sebbene il rapido ricambio che si ha nella polynja non permetta a una data particella d'acqua di raggiungere l'equilibrio completo con l'atmosfera, esso dovrebbe tuttavia consentire un significativo scambio di gas. L'esistenza di grandi polynja a calore sensibile potrebbe perciò alterare la natura dell'interazione atmosfera-oceano e avere di conseguenza grandi effetti sul chimismo e sulle condizioni climatiche tanto dell'atmosfera quanto dell'oceano su scala globale.

Molto di quanto sappiamo riguardo alle polynja di oceano aperto deriva dallo studio di una polynja spettacolare che si formò a metà degli anni settanta presso il Mare di Weddell. La polynja di Weddell si impose all'attenzione per varie ragioni, una delle quali era data semplicemente dalle sue eccezionali dimensioni: 1000 chilometri di lunghezza per 350 di larghezza.

Un'altra caratteristica di rilievo fu la sua persistenza: essa venne osservata la prima volta nell'inverno australe del 1974. Durante l'estate successiva la copertura di ghiaccio di tutta questa regione dell'Oceano Antartico si fuse del tutto, come avviene normalmente, ma quando la copertura si riformò nell'inverno del 1975 la polynja di Weddell ricomparve. Essa si era spostata soltanto un poco verso ovest (in accordo con le correnti superficiali prevalenti di questa regione), ma sia la forma, sia le dimensioni erano pressappoco le stesse del 1974. L'anno successivo vide la stessa successione di eventi: quando nell'inverno del 1976 la copertura di ghiaccio si riformò la polynja ricomparve, lievemente a ovest rispetto alla sua posizione del 1975 e alquanto rimpicciolita.

Nel 1977 la polynja di Weddell non fu più rilevata, ma la sua permanenza nei tre inverni precedenti indicava l'esistenza, nei mesi estivi, di un qualche meccanismo di «memoria», qualche effetto residuo di grande scala in grado di rigenerare la polynja dopo lo scioglimento estivo dei ghiacci. È probabile che la chiave di questo meccanismo si trovi nella salinità. Quando i ghiacci fondevano, nella primavera ed estate australi, l'area tutt'attorno alla polynja rimaneva coperta da un sottile strato di acqua relativamente dolce. Per la sua minore densità quest'acqua restava in superficie senza mescolarsi con le acque sottostanti. L'area corrispondente alla polynja invece conservava in superficie una salinità maggiore, non essendo stata alterata dalla fusione del ghiaccio.

Quando l'atmosfera gelida dell'inverno successivo iniziò a sottrarre calore alla superficie dell'oceano, la stratificazione delle acque nella regione della polynja dovette diventare instabile: l'acqua salata di superficie, raffreddandosi

Questa vista polare rivela alcune polynja di oceano aperto (*1-3*) e costiere (*A-J*). L'immagine mostra la copertura dei ghiacci mediata sull'arco di tre giorni, nell'inverno del 1980.

e divenendo perciò più densa, sarebbe affondata, mentre acqua più calda sarebbe risalita dagli strati sottostanti, stabilendo nuove celle di convezione e riformando la polynja. In altre aree invece l'acqua superficiale relativamente dolce si sarebbe semplicemente congelata, ricostituendo la copertura di ghiaccio superficiale.

Gli effetti della polynja di Weddell furono paragonabili alle sue dimensioni. La polynja lasciò una chiara impronta ben al di sotto della superficie oceanica. Per esempio misurazioni di temperatura eseguite a varie profondità nell'area della polynja di Weddell durante le estati 1973 e 1977 (ossia prima e dopo la comparsa della polynja) evidenziano sorprendenti variazioni nella temperatura delle acque profonde. Variazioni tanto più eclatanti quando si consideri la grande stabilità termica delle acque profonde oceaniche sulle scale di tempo prese in esame. Le temperature misurate nella regione erano più basse di ben 0,8 gradi Celsius nel 1977 rispetto al 1973 a tutte le profondità fino a 2500 metri.

Il calore mancante era probabilmente stato portato in superficie nella polynja per convezione. Stime ragionevoli suggeriscono che il tasso di ricambio convettivo necessario al trasporto di simili quantità di calore doveva arrivare a sei milioni di metri cubi al secondo durante l'inverno, quando la polynja era attiva. In questo processo la polynja potrebbe aver prodotto fino alla metà dell'acqua di fondo antartica che defluì dal Mare di Weddell.

Che cosa fece sì che la polynja di Weddell si formasse proprio in quel punto? La risposta più plausibile è che ciò sia dipeso in qualche modo dalla topografia del fondo oceanico. La prima comparsa della polynja avvenne esattamente in corrispondenza di un rilievo del fondo, il banco Maud, che è una montagna sottomarina. Qui il fondo si trova circa 3500 metri più vicino alla superficie che altrove. Probabilmente l'acqua profonda circumpolare, più calda, viene deflessa verso la superficie quando passa sopra il banco Maud. Ciò dovrebbe «predisporre» la regione, di modo che altri eventi, come un mescolamento di acque superiore al normale in seguito a tempeste di vento, potrebbero trasportare con più facilità acqua calda e salata verso la superficie, innescando così la formazione di celle convettive.

I dati forniti dai satelliti a partire dal 1976 sembrerebbero confermare questa ipotesi. In molti di questi anni le misurazioni nel campo delle microonde hanno rilevato polynja relativamente piccole o aree in cui la copertura di ghiaccio si presentava molto sottile o frammentaria in prossimità del banco Maud. Un altro indizio è stato trovato in una regione chiamata Mare del Cosmonauta, circa a 65 gradi di latitudine sud, 45 gradi di longitudine est, dove la circolazione oceanica, forse in risposta alla topografia del fondo, sembra pure essere predisposta alla formazione di celle convettive. Nel Mare del Cosmonauta, come in corrispondenza del banco Maud, si formano spesso polynja di dimensioni ridotte e coperture di ghiaccio più scarse. Di solito queste polynja non durano un intero inverno.

Per verificare quest'ipotesi uno di noi (Gordon) ha collaborato a organizzare una spedizione per raggiungere in inverno la regione del banco Maud attraverso i ghiacci del pack. Il nostro primo tentativo avvenne nel 1981 a bordo della nave sovietica *Mikhail Somov*. In questo viaggio non riuscimmo a raggiungere la zona al di sopra del banco Maud, ma vi arrivammo abbastanza vicino da poter raccogliere dati preziosi sulla interazione tra acque profonde e strati superficiali sotto la copertura di ghiaccio. Rilevammo un coinvolgimento di entità inattesa dell'acqua profonda negli strati di superficie, che sembrava denunciare un attivo flusso verticale di calore.

Riuscimmo a raggiungere il banco Maud al nostro secondo tentativo, nell'inverno australe del 1986, nel corso di una spedizione internazionale a bordo della nave tedesca *Polarstern*, dell'Istituto Alfred Wegener per la ricerca polare e marina di Bremerhaven. Benché l'analisi dei dati da noi ricavati in quella spedizione non sia ancora completa, troviamo che vi era in effetti una risalita di acque profonde in corrispondenza del banco Maud. Il fatto che vi fosse una risalita di acque nel 1986, anche in assenza della polynja, indicava che la topografia del fondo stava probabilmente deflettendo verso l'alto il flusso dell'acqua profonda circumpolare. Oltre ad aver delucidato i meccanismi implicati nella formazione della polynja di Weddell, la spedizione della *Polarstern* ha rappresentato una via relativamente nuova e suggestiva per lo studio dell'oceano, combinando le osservazioni della superficie oceanica su grande scala da satellite con la ricerca locale eseguita con navi.

Lo studio delle polynja sta conducendo gli oceanografi a una nuova comprensione dei meccanismi in atto nell'Oceano Antartico. Grazie a ciò verranno considerati in modo nuovo i processi che governano in larga misura il clima planetario, ma nel contempo si sollevano nuovi importanti interrogativi. Per esempio, può la circolazione in grandi polynja, come quella di Weddell, alterare la velocità con cui avviene lo scambio dell'anidride carbonica tra oceano e atmosfera? L'acqua profonda che emerge a sud di 60 gradi di latitudine è ricca di anidride carbonica e cede notevoli quantità di questo gas all'atmosfera. Dato che le polynja accelerano il flusso verso l'alto dell'acqua profonda circumpolare, ci si potrebbe attendere che esse accelerino di pari passo il rilascio di anidride carbonica, forse contribuendo all'«effetto serra» globale. D'altra parte, come detto sopra, il ricambio nelle polynja avviene così velocemente che le singole particelle d'acqua non rimangono in superficie tanto a lungo da scambiare molta anidride carbonica con l'atmosfera. Pertanto rimane imprecisabile l'effetto complessivo delle polynja sul livello di anidride carbonica nell'atmosfera. D'altra parte non è neppure noto l'effetto che i tassi previsti di riscaldamento atmosferico potranno avere sulla frequenza e sull'estensione delle future polynja.

Che parte hanno le polynja, in generale, nel ricambio delle acque profonde che ha luogo nell'Oceano Antartico? Noi sappiamo che la polynja di Weddell ebbe un effetto assai pronunciato, raffreddando un grande volume di oceano ed esponendo una vasta superficie oceanica all'atmosfera. Ma le polynja di simili dimensioni sono rare oppure si manifestano con relativa frequenza? E quanta parte del ricambio che avviene presso la piattaforma continentale è legato invece alle polynja costiere? Gli oceanografi hanno ora gli strumenti per poter rispondere a queste domande e a molte altre. La combinazione di osservazioni complete a lungo termine eseguite con i satelliti e i rilevamenti particolareggiati sul posto in inverno potranno permettere di definire modelli ancor più precisi di questi processi importanti e di amplissime ripercussioni nell'Oceano Antartico.

BIBLIOGRAFIA

GORDON ARNOLD L., *Weddell Deep Water Variability* in «Journal of Marine Research», 40, supplemento, pp. 119-217, 1982.

ZWALLY H. JAY, COMISO JOSEFINO C., PARKINSON CLAIRE L., CAMPBELL WILLIAM J., CARSEY FRANK D. e GLOERSEN PER, *Antarctic Sea Ice, 1973-1976: Satellite Passive-Microwave Observations*, NASA Special Publication 459, 1983.

ZWALLY H. JAY, COMISO JOSEFINO C. e GORDON ARNOLD L., *Antarctic Offshore Leads and Polynyas and Oceanographic Effects* in *Oceanology of the Antarctic Continental Shelf* a cura di Stanley S. Jacobs, American Geophysical Union, 1985.

COMISO J. C. e GORDON A. L., *Recurring Polynyas over the Cosmonaut Sea and the Maud Rise* in «Journal of Geophysical Research», 92, n. C3, 15 marzo 1987.

La neurobiologia della sanguisuga

Si è appurato che un unico neurotrasmettitore, la serotonina, regola in questo anellide, utilizzato fin dall'antichità nella pratica medica, una vasta gamma di comportamenti connessi alle particolari abitudini alimentari

di Charles M. Lent e Michael H. Dickinson

Nel film *La regina d'Africa* Humphrey Bogart, trovandosi alcune sanguisughe attaccate al torace, si comportava come avrebbe fatto la maggior parte di noi esclamando: «Se c'è qualcosa al mondo che odio, sono le sanguisughe, sporchi, piccoli diavoli!» Tuttavia per un neurobiologo questo animale che si nutre succhiando il sangue è una vera meraviglia. Il suo sistema nervoso è semplice e altamente organizzato e i suoi neuroni sono di grandi dimensioni, facilmente identificabili e raggiungibili con microelettrodi. Queste caratteristiche rendono la sanguisuga un animale particolarmente adatto per lo studio dell'attività di neuroni specifici. In più, quasi per una rivincita da parte della natura, le ripugnanti abitudini alimentari di questo animale si sono dimostrate preziose, consentendo di compiere osservazioni che hanno permesso al nostro laboratorio di scoprire la funzione di un importante gruppo di neuroni.

Il nome scientifico della sanguisuga, *Hirudo medicinalis*, riflette il suo impiego nella pratica medica, un tempo largamente utilizzata, del salasso o flebotomia. L'applicazione delle sanguisughe è citata nelle opere di Galeno, medico greco del II secolo d.C., e i metodi per eseguire il salasso furono descritti con precisione da Avicenna, filosofo e medico musulmano del Medioevo. In quel periodo la pratica del salasso era diventata un trattamento così comune per la maggior parte delle malattie che la parola «sanguisuga» assunse molteplici significati; essa poteva indicare qualsiasi trattamento terapeutico, cataplasma o farmaco, comprendendo persino il medico stesso.

La popolarità dell'applicazione delle sanguisughe raggiunse il suo massimo nel tardo XVIII e all'inizio del XIX secolo. Nella sola Francia venivano importati ogni anno da 30 a 40 milioni di sanguisughe. La richiesta di *Hirudo* era così grande che nell'Europa occidentale i raccoglitori la portarono fino alla quasi totale estinzione e, a tutt'oggi, la popolazione di sanguisughe in questa regione rimane scarsa. Nel tardo XIX e all'inizio del XX secolo l'applicazione delle sanguisughe perse sensibilmente popolarità e rimase confinata principalmente alla rimozione del sangue dagli ematomi.

Molti rimedi popolari vengono oggi riscoperti e, data la lunga tradizione dell'applicazione delle sanguisughe, non è del tutto sorprendente la ricomparsa di tale pratica nella medicina moderna. Oggi in Europa e in America le sanguisughe sono un complemento post-operatorio nella chirurgia plastica e nella ricongiunzione chirurgica di estremità amputate. Le sanguisughe aumentano le probabilità di riuscita di questi interventi operatori rimuovendo il sangue in eccesso e impedendo perciò la necrosi dei tessuti durante la ricrescita dei capillari. Inoltre le sanguisughe sono la fonte di un potente anticoagulante, la irudina, il cui gene è stato ora clonato. Sembra anche che la loro saliva sia in grado di esercitare un'azione inibitoria sulla proliferazione tumorale.

Nonostante l'impiego di *Hirudo* nella pratica medica sia di lunga data, fino a non molto tempo fa si conosceva poco a proposito del comportamento alimentare delle sanguisughe nel loro ambiente naturale. Abbiamo perciò iniziato a esaminare questo comportamento nei particolari e durante le ricerche abbiamo scoperto prove fondamentali sul ruolo funzionale di uno specifico gruppo di neuroni presenti nel sistema nervoso della sanguisuga.

Le sanguisughe sono vermi cilindrici metamerici (anellidi) evolutisi dai lombrichi. Esse hanno un apparato a ventosa a ciascuna estremità: quello all'estremità cefalica contiene la bocca mentre il più grande, all'estremità caudale, è impiegato per spostarsi nell'acqua. Nei nostri studi abbiamo scoperto che le sanguisughe affamate rimangono presso la riva di uno stagno, alla superficie dell'acqua. Esse sono messe in allarme dalle increspature che si formano sulla superficie, come quelle provocate dai mammiferi, la fonte principale del sangue di cui si nutrono. Una sanguisuga messa in allerta orienta la testa verso l'origine delle increspature e inizia a nuotare con movimenti ondulatori. Le sanguisughe non raggiungono sempre il bersaglio, ma la loro precisione è straordinaria: la maggior parte di esse nuota entro 25 gradi dalla sorgente dell'onda.

La sanguisuga smette di nuotare nel momento in cui entra in contatto con un oggetto, che poi esplora strisciandovi sopra con le ventose; quando trova una zona calda, morde. (Abbiamo confermato l'attrazione della sanguisuga per il calore osservando che diversi esemplari si raggruppavano sotto a un bicchiere di acqua calda collocato sul coperchio di un acquario.) Se con il primo morso non riesce a estrarre sangue, la sanguisuga continua a esplorare e morde un'altra zona calda. Per studiarne il comportamento al momento del morso, abbiamo collocato alcune sanguisughe su uno strato di paraffina posto su una superficie calda e poi abbiamo contato il numero di morsi nella cera. Le tre mascelle seghettate dell'animale provocano segni caratteristici che ricordano il marchio della Mercedes Benz. Abbiamo notato che i morsi sono più frequenti quando la paraffina ha una temperatura compresa tra 35 e 40 gradi Celsius, l'intervallo di temperatura corporea dei mammiferi.

L'apparato boccale di *Hirudo* è composto da vari muscoli e ghiandole. Le contrazioni ritmiche dei muscoli mascellari fanno muovere le tre mascelle seghettate semicircolari avanti e indietro, incidendo la cute dell'ospite. La saliva viene secreta da dotti che sboccano in mezzo alle seghettature delle mascelle. Questa configurazione consente l'iniezione della saliva, con il suo muco lubrificante e con il principio anticoagulante irudina, in profondità nelle incisioni. Quando il sangue fluisce all'interno della cavità boccale della sanguisuga, esso viene pompato nel tubo digerente da contrazioni ritmiche della faringe, sincronizzate con i movimenti delle mascelle.

In laboratorio nutriamo le sanguisughe con una miscela di globuli rossi e di liquido di coltura tissutale. La miscela riscaldata viene posta in una provetta, chiusa da un foglio di paraffina che viene morso dalle sanguisughe. Esse cominciano immediatamente a nutrirsi e ingeriscono sangue per circa 30 minuti, riempiendo completamente il tubo digerente e i suoi diverticoli. L'ingestione è invariabilmente forzata, tanto che, pur tirandoli con forza o addirittura infliggendo loro tagli, questi tenaci anellidi non vengono distolti dal pasto una volta che abbiano iniziato a nutrirsi. Ingeriscono enormi quantità di sangue, da sette a nove volte il loro peso, uno dei pasti più abbondanti di tutto il regno animale. Non deve quindi sorprendere che la sanguisuga si nutra raramente. In laboratorio si è osservato che essa rimane sazia anche per un intero anno.

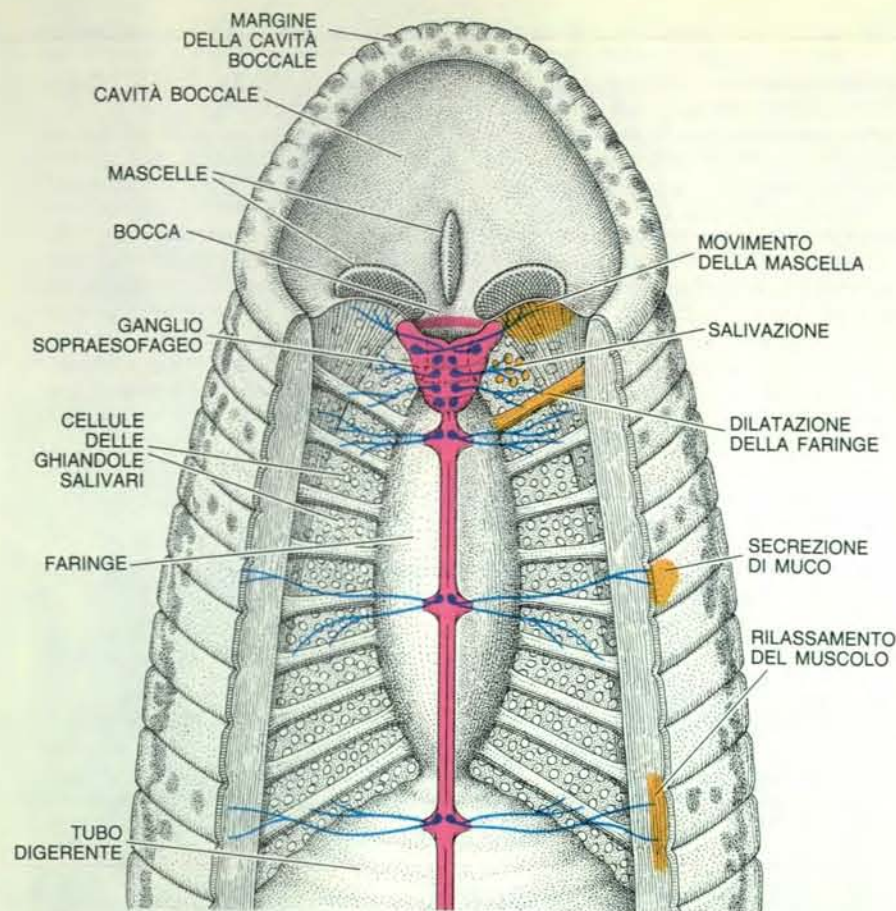
Dopo il pasto, il corpo della sanguisuga appare dilatato al massimo e l'animale è a mala pena in grado di muoversi. Le sanguisughe sazie si comportano in maniera assai diversa da quelle affamate. Esse cercano l'acqua più profonda, tendono a infilarsi nelle fessure delle rocce e dei tronchi caduti sul fondo e non presentano il nuoto spontaneo delle sanguisughe affamate. Invece di mordere una superficie calda, le sanguisughe sazie la evitano, volgendo la testa e allontanandosi a nuoto.

Quale poteva essere la causa di questa drastica variazione di comportamento? Ci siamo chiesti se la distensione della parete corporea potesse essere lo stimolo per cessare l'ingestione. Abbiamo osservato che quando provocavamo la distensione del corpo di alcune sanguisughe che si stavano nutrendo iniettando nel loro tubo digerente una soluzione salina, esse smettevano immediatamente di alimentarsi. Abbiamo poi notato che se praticavamo alcuni tagli nella parete corporea di sanguisughe sazie e svuotavamo il loro tubo digerente, gli animali iniziavano di nuovo a mordere se venivano posti su una superficie calda. Infine abbiamo scoperto che, se praticavamo tagli nelle sanguisughe durante il pasto permettendo al sangue di fuoriuscire, l'ingestione veniva prolungata di ore. Il ciclo biologico delle sanguisughe, quindi, si alterna tra la condizione di fame e quella di sazietà e il «commutatore» tra le due è dato dalla distensione della parete corporea.

Avendo ormai individuato i principali elementi delle abitudini alimentari delle sanguisughe, eravamo pronti a dedicarci allo studio delle basi nervose del loro comportamento. Nelle sanguisughe e in altri anellidi metamerici, ciascun segmento contiene un ganglio o ammasso di cellule nervose. Il sistema nervoso centrale delle sanguisughe è costituito da 32 gangli ciascuno dei quali è in comunicazione con il resto del corpo attraverso due paia di radici laterali. I 21 gangli della parte centrale del corpo sono disposti lungo le connessioni longitudinali come perle su un filo. Dei rimanenti gangli, quattro sono fusi nel capo a formare il ganglio sopraesofageo o cefalico e sette sono fusi nella coda a formare il ganglio caudale (si veda l'articolo *Il sistema nervoso della sanguisuga* di John G. Nicholls e David Van Essen in «Le Scienze» n. 68, aprile 1974).

Ciascun ganglio comprende circa 400 neuroni. Nelle sanguisughe i neuroni sensoriali e motori inviano i loro assoni (lunghe estensioni della cellula che trasportano gli impulsi nervosi) nelle radici laterali, dove i segnali sono inviati ai recettori sensoriali e alle cellule effettrici rappresentate da fibre muscolari e cellule ghiandolari. Gli interneuroni della sanguisuga (neuroni che comunicano esclusivamente con altri neuroni) hanno assoni che si estendono soltanto alle connessioni.

Le cellule nervose di tutti gli animali,

Le sanguisughe si attaccano al corpo di Humphrey Bogart in una scena memorabile di *La regina d'Africa*. Katharine Hepburn le copre con sale, allo scopo di farle rigurgitare e lasciare la presa. L'attore spiega che questo trattamento servirà a evitare che gli animali lascino la testa conficcata nella pelle, un'affermazione in realtà priva di fondamento.

La vista ventrale della testa di una sanguisuga sezionata mostra il sistema nervoso e gli organi deputati all'alimentazione. Le sole cellule nervose raffigurate sono i grandi neuroni che contengono serotonina (*in blu*). Il ganglio sopraesofageo contiene due grandi cellule laterali alla periferia e quattro coppie di cellule di Retzius vicino al centro. Gli altri gangli contengono due cellule di Retzius ciascuno e sono uniti da connessioni longitudinali. I neuroni di ogni ganglio inviano assoni a una coppia di radici laterali in collegamento con ghiandole e muscoli periferici. Gli impulsi provenienti dalle cellule di Retzius e dalle grandi cellule laterali provocano il rilascio di serotonina in corrispondenza degli organi periferici (*in giallo*) inducendo il movimento delle mascelle, la salivazione, la contrazione dei muscoli della faringe, la secrezione di muco e il rilassamento dei muscoli nella parete corporea.

comprese le sanguisughe, sono accomunate da caratteristiche fisiologiche fondamentali. Le membrane dei neuroni sono polarizzate elettricamente: ioni di carica negativa contenuti nella cellula fanno sì che il potenziale elettrico all'interno della cellula vada da −50 a −80 millivolt rispetto all'esterno. Se ioni di carica positiva penetrano nella cellula, la sua membrana si depolarizza; quando la differenza di potenziale tra l'interno e l'esterno diminuisce fino a un valore critico, chiamato soglia, la cellula scarica un impulso elettrico o potenziale d'azione. Gli impulsi vengono rapidamente trasmessi lungo gli assoni. L'impulso di un motoneurone, per esempio, viaggia dal ganglio a un muscolo e ne provoca la contrazione, mentre gli impulsi provenienti dai neuroni sensoriali viaggiano dalla periferia verso l'interno.

I neuroni comunicano l'uno con l'altro in corrispondenza delle sinapsi, strutture simili a bottoni poste alle terminazioni degli assoni. Ci sono due tipi di sinapsi, elettriche e chimiche. Le sinapsi elettriche mettono in comunicazione il citoplasma dei neuroni, permettendo agli ioni di fluire direttamente fra di essi. Questo accoppiamento porta le cellule allo stesso potenziale elettrico e quindi a livelli di eccitabilità simili. Sinapsi di questo tipo conducono l'impulso in entrambe le direzioni fra due cellule e, nella sanguisuga, svolgono un ruolo chiave nella sincronizzazione dell'attività di specifici gruppi di neuroni.

Le sinapsi chimiche, al contrario, conducono l'informazione per via extracellulare e soltanto in una direzione. Un impulso innesca il rilascio di un composto chimico dalle terminazioni della cellula presinaptica (quella in cui ha avuto origine l'impulso). Questo «neurotrasmettitore» si diffonde verso la cellula postsinaptica, si lega ai suoi recettori e altera il suo potenziale di membrana.

Le sinapsi chimiche possono essere eccitatorie quando agiscono depolarizzando la cellula postsinaptica e aumentando la probabilità che essa generi un impulso, o inibitorie, quando agiscono diminuendo questa probabilità. Singoli neuroni possono eccitare alcune cellule e inibirne altre, a seconda delle proprietà dei recettori postsinaptici. I vari segnali sinaptici eccitatori e inibitori diretti verso un neurone sono integrati per stabilire istante per istante il potenziale di membrana; ciò significa che tutte le informazioni stabiliscono insieme il livello di eccitabilità della cellula. Alcuni interessanti esperimenti hanno dimostrato che, nella sanguisuga, l'attività sinaptica fra singoli neuroni produce alcuni comportamenti semplici e stereotipati: contrazioni muscolari riflesse, nuoto con movimenti oscillatori e battito ritmico del cuore.

La serie di neurotrasmettitori che agisce nei neuroni della sanguisuga è simile a quella che si trova nel cervello dei mammiferi. Comprende l'acetilcolina, l'acido gamma-amminobutirrico (GABA), alcuni peptidi e tre monoammine: l'octopammina, la dopammina e la serotonina. Ci interessammo alle possibili funzioni della serotonina quando fu scoperto, alcuni anni addietro, che i più grossi neuroni della sanguisuga, le cellule di Retzius, contengono grandi quantità di questo composto.

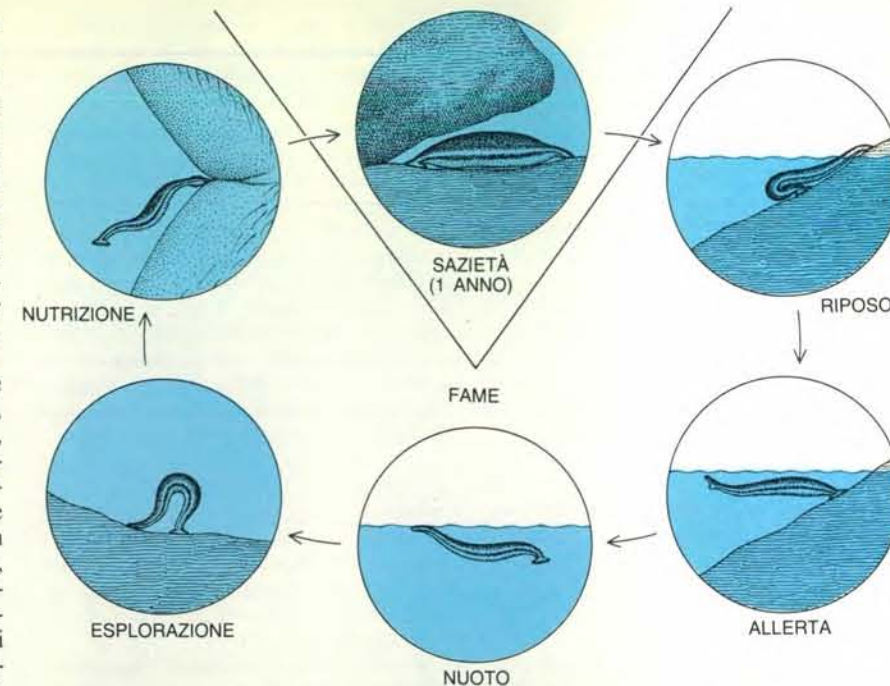
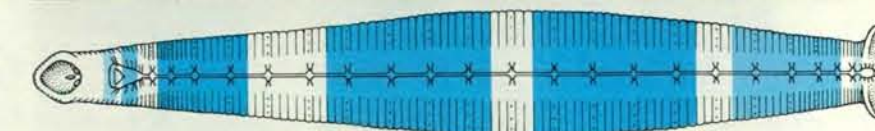
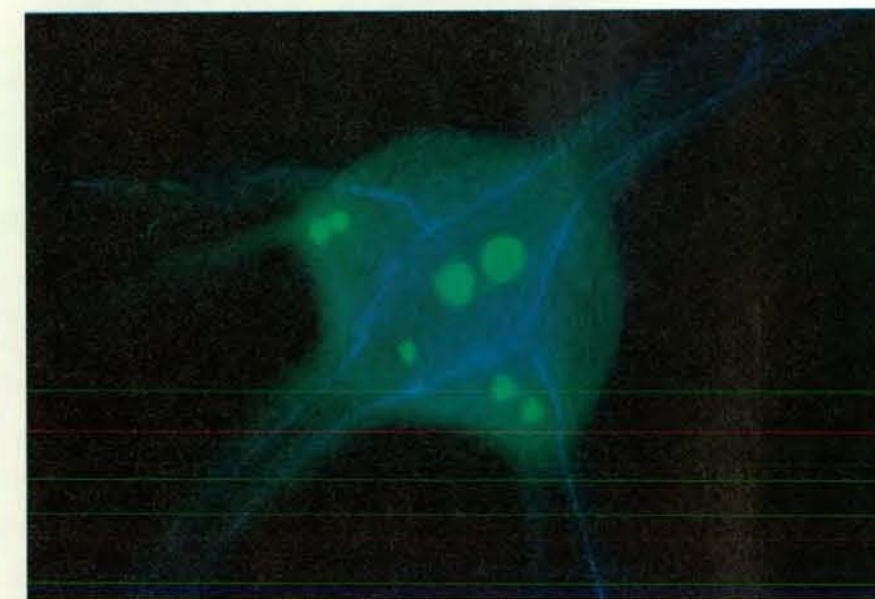
Queste cellule, descritte per la prima volta nel 1891 dall'anatomista svedese Gustaf Retzius, furono le prime a essere identificate in diversi animali. Ciascun ganglio contiene una coppia di cellule di Retzius i cui assoni confluiscono nelle radici laterali, si ramificano più volte e si diramano diffusamente verso gli organi periferici del corpo. Le cellule possiedono gli enzimi che sintetizzano la serotonina e le loro membrane la accumulano in quantità. Tra i restanti neuroni che inviano assoni verso la periferia, soltanto un'altra coppia contiene serotonina: le grandi cellule laterali presenti nel primo segmento del sistema nervoso.

Inoltre, i gangli della sanguisuga contengono quattro classi di interneuroni che hanno alte concentrazioni di serotonina. I neuroni di due delle classi sono accoppiati e posti sulle creste laterali della maggior parte dei gangli. Le altre due classi sono presenti in modo diseguale nei gangli distribuiti lungo tutto il corpo della sanguisuga. Gli interneuroni postero-mediani di solito si trovano a coppie nei gangli frontali, diventano singoli nella parte mediana del corpo e spesso mancano del tutto nei gangli posteriori. In più, i primi sette gangli possiedono coppie supplementari di interneuroni antero-mediani. Di conseguenza, verso la parte cefalica della sanguisuga vi sono circa 10 neuroni contenenti serotonina in ogni ganglio, mentre il loro numero si riduce a cinque in direzione caudale.

Recentemente abbiamo utilizzato una tecnica particolarmente sensibile, la cromatografia liquida ad alta pressione, per sapere se queste differenze nel numero di cellule avessero un corrispettivo nelle quantità di serotonina nei gangli. Si è visto che effettivamente è così: i gangli anteriori contengono una quantità di serotonina circa cinque volte maggiore dei gangli posteriori. L'esperienza ci permette di ipotizzare l'esistenza di una funzione della serotonina e dei neuroni per la serotonina espressa dal capo come, per esempio, la nutrizione.

Per anni, tuttavia, la funzione delle cellule di Retzius è rimasta sconosciuta, nonostante le attive ricerche. Tuttavia, poiché le dimensioni delle strutture biologiche spesso riflettono la loro importanza funzionale, era difficile credere che cellule così grandi non avessero un ruolo importante. Poi, circa 15 anni fa, uno di noi (Lent) scoprì un ruolo apparentemente banale delle cellule nella secrezione di muco. Lavorando su sezioni contenenti un ganglio segmentale connesso attraverso le sue radici laterali a una sezione di parete della parte centrale del corpo, applicammo correnti depolarizzanti alle membrane delle cellule di Retzius, aumentando la frequenza degli impulsi della cellula. Gli impulsi venivano inviati al corpo, dove provocavano la secrezione di muco dalle ghiandole cutanee. Successivamente asportammo il ganglio e scoprimmo che potevamo ancora indurre la secrezione di muco bagnando la parete corporea con soluzioni di serotonina.

Nel 1978 Adrian J. R. Mason e Lucy D. Leake del Politecnico di Portsmouth, in Inghilterra, dimostrarono che la serotonina secreta dalle cellule di Retzius decontrae anche i muscoli della parete corporea e perciò ne aumenta la capacità di distensione. Due anni dopo William B. Kristan, Jr., e Michael P. Nusbaum dell'Università della California a San Diego scoprirono che la serotonina degli interneuroni laterali ha un ruolo nel generare i movimenti muscolari ondulatori che caratterizzano il nuoto delle sanguisughe. Poi, circa cinque anni fa, Cameron G. Marshall stabilì, nel nostro laboratorio, che la serotonina è l'unico neurotrasmettitore che stimola efficacemente le cellule della ghiandola salivare della sanguisuga a secernere la saliva.

Nella sanguisuga, i neuroni contenenti serotonina hanno un'altra caratteristica saliente. Quando Bryan M. Frazer e uno di noi (Lent) lavoravano alla State University of New York a Stony Brook, scoprirono che tutti i neuroni contenenti serotonina sono collegati fra loro da sinapsi elettriche e molti condividono segnali sinaptici provenienti da una sorgente comune. L'interconnessione elettrica mantiene le cellule a livelli di eccitabilità simili e le sinapsi in comune le eccitano o le inibiscono simultaneamente. Entrambi i tipi di connessione tendono a sincronizzare la scarica degli impulsi

Il ciclo alimentare della sanguisuga *Hirudo medicinalis* è un'alternanza di fame e sazietà. La prima fase comprende due sottofasi: ricerca di cibo e ingestione. Dapprima la sanguisuga nuota verso una sorgente di onde; quando trova un ospite a sangue caldo si nutre per circa mezz'ora, ingerendo fino a nove volte il proprio peso in sangue. Le sanguisughe sazie non mordono, anzi evitano le superfici calde e si nascondono sotto le rocce o in fessure.

La serotonina fa apparire luminosi i neuroni in un ganglio centrale di sanguisuga nella microfotografia a fluorescenza (*in alto*). Al centro si vedono due grandi cellule di Retzius, mentre due coppie di interneuroni laterali appaiono presso i margini. La cellula più piccola accanto alle cellule di Retzius è un interneurone postero-mediano. I gangli frontali contengono due di questi interneuroni e un'altra coppia di interneuroni antero-mediano, mentre i gangli caudali possono avere solo le cellule di Retzius e i due interneuroni laterali. Tali differenze spiegano la concentrazione più alta di serotonina nei segmenti anteriori e centrali del corpo, come è indicato dai due toni di colore (*in basso*). Il fenomeno è coerente con il ruolo svolto dalla serotonina nella nutrizione, un comportamento in cui prevale la testa.

di questi neuroni correlati chimicamente tra loro.

Ci si potrebbe attendere che questi neuroni sincronizzati svolgano una funzione coordinata e tuttavia si è osservato che i neuroni contenenti serotonina mostrano una curiosa varietà di ruoli. In particolare, i legami tra serotonina, salivazione e movimenti attivi ci portarono a formulare una semplice domanda: perché una sanguisuga nuota e secerne saliva? Entrambe le attività sono associate alla nutrizione (le sanguisughe nuotano verso le loro prede e secernono saliva mentre ingeriscono il sangue) e così ipotizzammo che la serotonina svolgesse un ruolo fondamentale nei comportamenti connessi con la nutrizione. Questa ipotesi impartì una svolta fondamentale al nostro lavoro e ci condusse a effettuare una serie di esperimenti per valutare il ruolo della serotonina nel comportamento e nella fisiologia dell'alimentazione della sanguisuga.

In una prima serie di esperimenti cercammo di stabilire gli effetti della serotonina sul comportamento di animali vivi. Se le sanguisughe sono immerse in una soluzione di serotonina, i comportamenti associati alla fame sono enormemente enfatizzati: le sanguisughe affamate iniziano a nuotare attraverso le onde increspate in metà del tempo da loro normalmente impiegato e la frequenza dei loro morsi aumenta di due terzi. Il bagno di serotonina fa crescere anche la quantità di sangue ingerito di un terzo, aumentando il volume del pasto a oltre 10 volte il peso corporeo dell'animale. E, ancora più importante, la serotonina induce il morso nelle sanguisughe sazie, che normalmente non mordono. In breve, la serotonina modifica il comportamento alimentare della sanguisuga qualitativamente e quantitativamente.

In seguito analizzammo gli effetti della serotonina sugli organi direttamente coinvolti nel comportamento alimentare. Irrorando di serotonina il capo parzialmente sezionato di una sanguisuga, osservammo movimenti morsicatori delle mascelle, secrezione di saliva e contrazioni ritmiche della faringe. Queste tre risposte continuarono a essere indotte dalla serotonina anche dopo aver rimosso i gangli e le connessioni, il che suggerisce che il trasmettitore agisce direttamente sugli organi interessati. Inoltre trovammo che il riscaldamento da 3 a 5 gradi Celsius del margine della cavità boccale della sanguisuga evocava le stesse risposte, ma soltanto se il sistema nervoso rimaneva intatto.

Prima di poter attribuire queste funzioni ai neuroni contenenti serotonina, dovevamo dimostrare che gli impulsi di questi neuroni sono sia sufficienti a provocare le risposte fisiologiche dell'alimentazione, sia effettivamente necessari per queste risposte. Per verificare il primo requisito preparammo alcune teste di sanguisuga in modo da poter inserire microelettrodi nelle cellule di Retzius anteriori e nelle grandi cellule laterali. Osservammo che la stimolazione a bassa frequenza delle grandi cellule laterali produce contrazioni della faringe e che frequenze più elevate provocano un pompaggio ritmico. La stimolazione delle cellule di Retzius aumenta la salivazione e, a frequenze più alte, produce contrazioni convulse nella muscolatura mascellare. Quindi, stimolando elettricamente la scarica dei neuroni effettori contenenti serotonina, si inducono le stesse risposte associate all'alimentazione che si ottengono con l'esposizione diretta alla serotonina.

Per dimostrare che le cellule sono in effetti necessarie per provocare le risposte dell'alimentazione, avevamo bisogno di un metodo per rimuovere i neuroni effettori dal circuito che determina il comportamento. Scegliemmo di iniettare nelle sanguisughe la neurotossina 5,7-diidrossitriptammina (5,7-DHT). Questa tossina si accumula in grande quantità nei neuroni contenenti serotonina, dove viene ossidata attraverso una reazione che produce radicali liberi dannosi e composti fenolici bruni.

Iniettammo la 5,7-DHT in sanguisughe affamate, che mordevano. Quando le esaminammo alcuni giorni dopo, scoprimmo che esse potevano nuotare e strisciare normalmente, ma non mordevano superfici calde. In effetti, si comportavano come se fossero state sazie e volgevano rapidamente altrove la testa. Scoprimmo che le loro cellule di Retzius e le grandi cellule laterali erano brune e di forma irregolare. In più, i livelli di serotonina nelle cellule di Retzius divenute brune erano diminuiti di più del 90 per cento.

Per esaminare gli effetti della tossina sulle singole cellule, inserimmo dei microelettrodi in neuroni sensoriali e motori specifici. Queste cellule mostravano impulsi e potenziali sinaptici normali. Pensammo che la tossina avesse distrutto i neuroni contenenti serotonina, perciò, quando ci dedicammo allo studio delle cellule di Retzius e delle grandi cellule laterali, misurammo, con nostro grande stupore, scariche di potenziali d'azione. A un esame più accurato trovammo che anche i recettori di membrana, gli ingressi sinaptici e gli assoni periferici apparivano normali.

Evidentemente, la 5,7-DHT non distrugge questi neuroni, ma semplicemente elimina la loro serotonina: la tossina induce una precisa lesione neurochimica. Ipotizzammo che, se la tossina bloccava il comportamento alimentare eliminando la serotonina, doveva essere possibile invertire l'effetto della tossina sul comportamento rimpiazzando il neurotrasmettitore. E infatti, quando immergemmo le sanguisughe trattate con la tossina in una soluzione di serotonina, esse ripresero a mordere ogni volta che veniva loro presentata una superficie calda.

Esaminammo poi preparazioni sezionate da animali trattati con la tossina e scoprimmo che né il riscaldamento del margine della cavità boccale, né la stimolazione elettrica ad alta frequenza delle cellule di Retzius e delle grandi cellule laterali poteva indurre i movimenti delle mascelle, la salivazione o il pompaggio. Quando le preparazioni furono irrorate con serotonina, tutte e tre le risposte fisiologiche ricomparvero. Arrivammo così alla conclusione che questi grossi neuroni effettori contenenti serotonina sono necessari per l'espressione del comportamento alimentare della sanguisuga.

Nel ganglio sopraesofageo le quattro coppie di cellule di Retzius, al centro, e una coppia di grandi cellule laterali, verso i margini superiori, appaiono in verde in una microfotografia a fluorescenza (*a sinistra*). I neuroni contenenti dopammina appaiono in blu. Quando sono trattati con la tossina 5,7-diidrossitriptammina, i neuroni contenenti serotonina diventano bruni e si deformano (*a destra*); la tossina abbassa i livelli di serotonina, ma non distrugge le cellule. Le sanguisughe così trattate strisciano e nuotano, ma non mordono.

L'applicazione di calore al margine della cavità boccale di una sanguisuga parzialmente sezionata stimola una rapida scarica elettrica delle grandi cellule laterali (*grafico in alto*). L'effetto della distensione è stato verificato riempiendo il tubo digerente dell'animale con una soluzione salina e poi vuotandolo di nuovo. La distensione inibisce le grandi cellule laterali, ma quando viene a mancare le cellule riprendono l'attività elettrica (*grafico al centro*). Se l'applicazione del calore e la distensione sono simultanee, vi è integrazione degli ingressi sinaptici: l'effetto inibitorio della distensione tende a prevalere su quello eccitatorio del calore (*grafico in basso*).

Questi esperimenti confermano il ruolo centrale della serotonina secreta dai neuroni nel dare origine al comportamento della nutrizione. Ne segue logicamente che stimoli, come il calore, che promuovono questo tipo di comportamento devono eccitare i neuroni contenenti serotonina alla scarica di impulsi. Al contrario, gli stimoli che determinano la fine del pasto, come la distensione della parete corporea, devono inibire l'attività delle cellule e interferire con il loro rilascio di serotonina.

Abbiamo studiato gli effetti del calore e della distensione della parete corporea su neuroni contenenti serotonina in preparazioni parzialmente intatte. Abbiamo scoperto che quando il margine boccale viene riscaldato le cellule di Retzius e le grandi cellule laterali sono eccitate dalle sinapsi e rispondono con impulsi ad alta frequenza. Per di più, la risposta al calore è specifica del margine boccale e non di altre parti della cute e, in generale, lo stimolo influenza soltanto i neuroni contenenti serotonina. La frequenza di scarica delle cellule di solito aumenta all'aumentare della temperatura del margine boccale. Uno stimolo che induce le sanguisughe ad alimentarsi, quindi, eccita anche i neuroni contenenti serotonina a scaricare impulsi ad alta frequenza.

Per verificare gli effetti della distensione abbiamo riempito il tubo digerente di queste preparazioni con una soluzione salina. Le cellule di Retzius e le grandi cellule laterali erano inibite per la durata della distensione. L'attività di scarica ricompariva quando la soluzione salina veniva rimossa. Abbiamo concluso che lo stimolo (distensione) che pone termine alla nutrizione della sanguisuga inibisce la scarica di impulsi da parte delle cellule e perciò blocca efficacemente il rilascio di serotonina dalle terminazioni assoniche. Inoltre le cellule integrano le loro informazioni sinaptiche, così che l'effetto inibitorio della distensione annulla l'effetto eccitatorio del calore. Perciò, la sanguisuga non si nutre quando il suo corpo è disteso.

Tutte le funzioni della serotonina sinora riconosciute nella sanguisuga si adattano quindi a uno schema nel quale il neurotrasmettitore chimico regola il comportamento alimentare, dalla ricerca della preda all'ingestione del pasto. Abbiamo anche scoperto che questo comportamento influenza i livelli di serotonina nel sistema nervoso della sanguisuga. Le sanguisughe affamate hanno un più alto contenuto di serotonina nei gangli rispetto a quelle sazie. L'ingestione è seguita rapidamente da una caduta del 25-30 per cento del contenuto di serotonina nei gangli anteriori e i livelli rimangono bassi per tutta la durata della distensione corporea. Quando la distensione diminuisce, i livelli di serotonina cominciano ad aumentare e la sanguisuga ristabilisce il suo comportamento alimentare.

Troviamo interessante il fatto che i comportamenti legati allo stimolo della fame, come il nuotare verso la preda, non diminuiscano i livelli di serotonina negli interneuroni che sono coinvolti in questi comportamenti. Kent T. Keyser di Stony Brook e Joyce Ono del City of Hope insieme a uno di noi (Lent) hanno misurato concentrazioni di serotonina negli interneuroni laterali superiori a 100 millimoli/litro, tra i più alti livelli di trasmettitore misurati in qualunque neurone. Gli alti livelli servono forse a garantire che la serotonina non diminuisca eccessivamente durante i ripetuti tentativi di trovare un pasto da parte di una sanguisuga affamata.

Le cellule di Retzius e le grandi cellule

laterali, al contrario degli interneuroni, sono collegate principalmente ai processi connessi con l'ingestione come il pompaggio della faringe, il morso, la salivazione, la capacità di distensione della parete corporea e la secrezione di muco (che risulta d'aiuto all'animale per aderire alla preda). L'ingestione riduce la serotonina nei gangli al mutare del comportamento della sanguisuga dalla fame alla sazietà. Riteniamo che l'eccitazione prolungata di queste cellule durante l'ingestione attivi il trasporto di serotonina lungo gli assoni, diminuendo così i livelli di serotonina nelle cellule.

Un singolo neurotrasmettitore esprime il comportamento alimentare nelle sanguisughe eccitando cellule nervose specifiche e organi che insieme producono un comportamento complesso a livello di tutto l'organismo. Soltanto pochi neuroni sono coinvolti in questa funzione, il che costituisce un ragguardevole esempio di economia del sistema nervoso che permette a questi animali, che hanno solo 400 neuroni per ganglio, di cacciare e predare i mammiferi. Fatto notevole, i neuroni effettori contenenti serotonina controllano anche i muscoli deputati all'ingestione e le ghiandole salivari in alcune specie di sanguisughe, lontanamente imparentate con *Hirudo medicinalis*, il cui apparato boccale è formato da una proboscide invece che da mascelle. In realtà, l'effetto della serotonina sul comportamento non si manifesta solo nelle sanguisughe: essa induce la salivazione, il morso e la contrazione della faringe almeno in animali appartenenti ad altri tre diversi *phyla*: nematodi, molluschi e insetti. Di conseguenza la scoperta di uno specifico ruolo di questi neuroni, chimicamente collegati, nel comportamento della sanguisuga può contribuire a chiarire gli schemi evolutivi dei composti neurochimici che regolano il comportamento.

BIBLIOGRAFIA

DICKINSON MICHAEL H. e LENT CHARLES M., *Feeding Behavior of the Medicinal Leech*, Hirudo medicinalis *L.* in «Journal of Comparative Physiology A», 154, n. 4, 1984.

LENT CHARLES M. e DICKINSON MICHAEL H., *Serotonin Integrates the Feeding Behavior of the Medicinal Leech* in «Journal of Comparative Physiology A», 154, n. 4, 1984.

SAWYER ROY T., *Leech Biology and Behavior*, Oxford University Press, 1986.

LENT C. M. e DICKINSON M. H., *On the Termination of Ingestive Behavior by the Medicinal Leech* in «The Journal of Experimental Biology», 131, n. 1, settembre 1987.

Un'antica tecnologia del ferro nell'Africa centrale

Recenti studi permettono di far luce sui metodi con cui, più di 2500 anni fa, una popolazione nei pressi del lago Victoria iniziò a fondere il ferro in forni a tino che potevano raggiungere temperature assai elevate

di Francis Van Noten e Jan Raymaekers

All'inizio degli anni cinquanta, alcuni membri della tribù Bahunde, nel sud dello Zaire, cavando sabbia a poca distanza dal loro villaggio fecero una curiosa scoperta. Nella sabbia erano sepolti oggetti di argilla simili a mattoni grossolani, molti dei quali decorati con disegni impressi ad andamento circolare o lineare. Due ricercatori dell'Istituto per la ricerca scientifica nell'Africa centrale, Jean Hiernaux ed Emma Maquet, furono chiamati a esaminare il materiale così inaspettatamente scoperto. I loro scavi dimostrarono che i mattoni avevano fatto parte di un forno a tino per la fusione del ferro. Quando i Bahunde vennero messi di fronte a quell'interpretazione, non riuscirono a vedere alcuna connessione fra forni di questo tipo e la propria cultura. Essi furono piuttosto inclini a credere che i forni fossero stati costruiti da una popolazione in possesso di una tecnica di fusione del ferro più raffinata della loro.

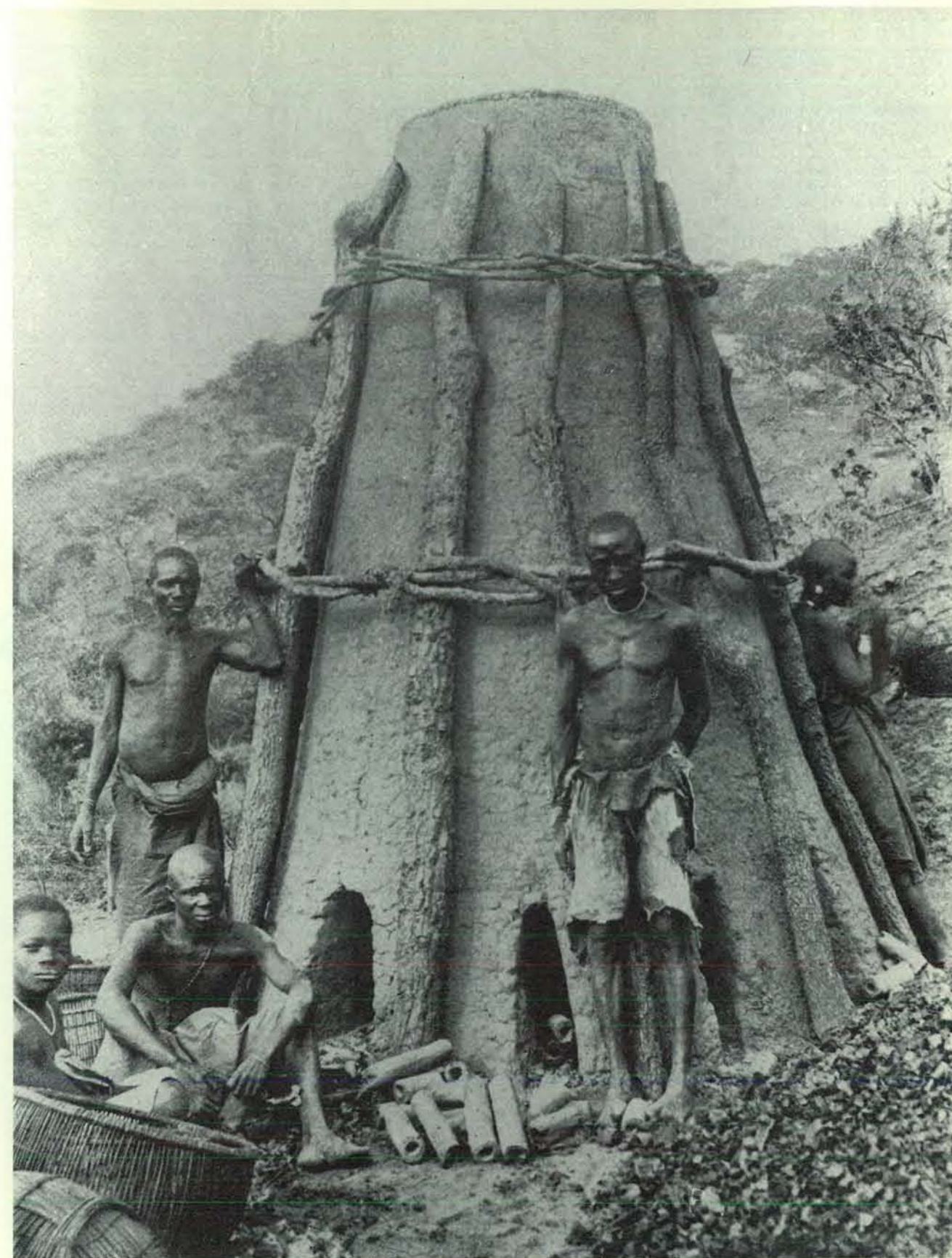
I Bahunde avevano ragione. Scoperte avvenute nello scorso decennio indicano che i forni a tino rappresentano un'importante tecnologia dell'antica Età del ferro, largamente diffusa nella regione interlacustre dell'Africa centrale (comprendente lo Zaire, il Ruanda, il Burundi, la Tanzania settentrionale, il Kenya sudoccidentale e l'Uganda). Usando solo materiali semplici, i fonditori dell'Età del ferro riuscirono a raggiungere temperature anche di 1400 gradi Celsius, disponendo in tal modo di un mezzo efficiente per estrarre ferro dal minerale. Questa tecnologia di fusione non solo era efficiente, ma ebbe anche lunga durata: apparsa nella regione interlacustre in epoca imprecisata durante il I millennio a.C., persistette in molte aree fino all'inizio del XX secolo. Benché le sue origini restino oscure, scavi sistematici combinati a ricerche etnografiche hanno cominciato a fornire un quadro dettagliato sul modo in cui i forni effettivamente funzionavano.

La popolazione della regione interlacustre (che si estende fra il lago Victoria e una serie di laghi minori) discende da immigranti che parlavano lingue della famiglia bantu. Gli immigranti provenivano in origine da un'area ora denominata Grassfields, nell'attuale Camerun. A partire da alcune migliaia di anni fa essi migrarono verso sud, occupando infine una regione che si estende dall'Africa meridionale sino al Camerun e al Kenya. Entro tale area vengono parlate circa 650 lingue della famiglia bantu. Le nostre ricerche si sono concentrate nella regione interlacustre, dove studi recenti indicano una sorprendente uniformità tecnologica nell'antica Età del ferro.

Tale uniformità è sia spaziale, sia temporale. Dal punto di vista spaziale, le scoperte recenti dimostrano che la cultura dell'antica Età del ferro fu del tutto omogenea nell'intera regione interlacustre. Inoltre la comparsa della tecnologia dell'Età del ferro risulta più o meno contemporanea nelle varie aree studiate finora. Al tempo dello scavo iniziale di Hiernaux e della Maquet, le tecniche di datazione con il radiocarbonio non erano ancora molto diffuse, cosicché le prime scoperte non poterono essere datate in modo attendibile. Con l'affermarsi su vasta scala dei metodi di datazione con il radiocarbonio, però, furono datati numerosi siti nel Ruanda, nel Burundi, in Uganda, nel Sudan, in Kenya, nello Zaire e in Tanzania e divenne chiaro che in tutte queste regioni la tecnologia dell'antica Età del ferro era apparsa attorno al VII secolo a.C.

La cultura dell'antica Età del ferro nella regione è caratterizzata non solo dalla tecnologia della produzione del ferro, ma anche da un tipo specifico di ceramica che si trova quasi sempre in connessione con essa. Uno di noi (Van Noten) ha dato alla combinazione di ceramica e di metodi di fusione del ferro la denominazione di «complesso industriale dell'antica Età del ferro». Dopo la sua comparsa nel I millennio a.C., il complesso industriale persistette per più di mille anni, raggiungendo il culmine nella prima metà del I millennio d.C., prima di essere sostituito nell'VIII secolo dalle società più ricche e dalla stratificazione sociale più marcata della tarda Età del ferro.

Il complesso industriale, che rappresenta l'inizio della tecnologia dell'Età del ferro nella regione interlacustre, ha creato qualche problema agli studiosi di preistoria. Negli anni sessanta era opinione comune che la diffusione dei metodi di produzione del ferro fosse associata alla migrazione di popoli di lingua bantu a partire dalla zona dei Grassfields nel Camerun. Ma le date che annunciano la comparsa della tecnologia dell'Età del ferro nella regione interlacustre, nel VII secolo a.C., sono fra le più antiche dell'Africa a sud del Sahara; esse sono certamente antiche quanto quelle di cui disponiamo per i Grassfields. Oggi si pensa che le popolazioni di lingua bantu abbiano cominciato a diffondersi dalla regione dei Grassfields molto tempo prima che vi apparissero i metodi caratteristici dell'Età del ferro. La tecnologia dell'Età del ferro potrebbe quindi essere stata acquisita nel corso della migrazione verso sud oppure potrebbe avere avuto origine indipendentemente nella regione interlacustre (benché quest'eventualità sembri meno probabile).

Anche se non siamo in grado di spiegare del tutto le origini di questa notevole tecnologia, possiamo renderne un'idea basandoci da un lato su ricerche archeologiche e dall'altro su quelle etnografiche. Queste ultime, a loro volta, hanno due componenti: le prime relazio-

Questo forno per la fusione del ferro fu costruito dalla tribù Fipa in Tanzania. Il tino è di argilla intonacata e si trova su un'ampia buca. L'impalcatura di rami serve per caricare il forno con carbone di legna e minerale. I tubi di argilla alla base sono ugelli; essi producono un tiraggio forzato per portare ossigeno al fuoco e innalzare la temperatura. Questi forni entrarono in uso in Africa centrale nel VII secolo a.C. ed erano ancora impiegati in alcune zone nel 1914, quando l'etnografo belga R. P. Wyckaert scattò la fotografia.

ni etnografiche sulla fusione del ferro nella regione e le ricostruzioni etnografiche che comportano la riproduzione delle tecniche originarie dell'Età del ferro in collaborazione con le popolazioni che vivono oggi in quell'area. Tali ricostruzioni sono possibili nell'Africa centrale in quanto le tecniche dell'Età del ferro continuarono a essere praticate fino a un periodo di cui sopravvive ancora il ricordo nelle persone più anziane. In alcune zone quei ricordi erano abbastanza vivi da permettere di riportare in uso le tecniche di fusione originarie dell'Età del ferro quando, durante la seconda guerra mondiale, vi fu scarsità di ferro importato.

Gran parte delle nostre ricerche si sono concentrate sulla regione di Kabuye, nel Ruanda meridionale, dove è stata scoperta una concentrazione di forni notevolmente densa: 23 siti nel raggio di tre chilometri. Tutti i forni sono stati scoperti per caso, in seguito a erosione o ad attività di costruzione. Quando sono stati eseguiti scavi per recuperarne i resti, generalmente sono venuti alla luce materiali simili. Fra questi vi erano buche (spesso con il margine esterno bruciato), frammenti di mattoni, tubi di argilla che fungevano da ugelli, scorie (scarti della fusione), carbone di legna e in qualche caso minerale di ferro. Di tanto in tanto nella stessa buca sono stati trovati frammenti di ceramica nello stile tipico dell'Età del ferro.

La prima fase della lavorazione del ferro, ovviamente, consiste nel procurarsi una quantità sufficiente della materia prima richiesta: ematite, un minerale di ferro. L'ematite contiene ferro sotto forma di ossido (Fe_2O_3) e si presenta in cristalli o come terra rossastra. Nella regione interlacustre l'ematite si trova in piccoli ammassi sui fianchi di alcune colline e nell'antica Età del ferro l'approvvigionamento del minerale si limitò probabilmente alla raccolta e allo scavo superficiali: vi sono poche tracce di estrazione in profondità. La presenza del minerale nel Ruanda è attestata persino dai toponimi: la cittadina più importante presso le colline di Kabuye si chiama Butare o Ubutare, che significano rispettivamente nella lingua locale, il Kinyarwanda, «pietra» o «pietra di ferro».

Una volta raccolto, il minerale doveva essere preparato per la fusione. Uno di noi (Van Noten) ha osservato la preparazione dell'ematite durante una ricostruzione, negli anni settanta, del procedimento di fusione del ferro presso la popolazione Madi dello Zaire settentrionale. Il minerale veniva preriscaldato per 30 minuti in un fuoco caldissimo. I Madi diedero varie motivazioni per quest'uso. Una di esse era che il riscaldamento dell'ematite facilitava la separazione del minerale di ferro dagli altri materiali associati. Una seconda ragione era che il riscaldamento rendeva il minerale più fragile e più facile da rompere in piccoli pezzi, che meglio si prestano alla fusione. I pezzi non possono però essere troppo piccoli, perché soffocherebbero il fuoco nel forno; perciò il minerale frantumato viene setacciato per rimuoverne i pezzi più piccoli e la polvere.

Il pretrattamento del minerale non era l'unica forma di preparazione che si richiedeva per poter procedere alla fusione. Il combustibile usato era il carbone di legna, che veniva ottenuto da alberi scelti appositamente. L'analisi al microscopio di frammenti di carbone di legna trovati sul fondo di forni dell'antica Età del ferro dimostra che i fonditori sceglievano con cura i loro alberi. Essi preferivano alberi dal legno compatto e con un'alta concentrazione di silice, che perciò bruciano lentamente, come varie specie di *Zizyphus* (lo stesso genere cui appartiene il giuggiolo). I residui di carbone di legna che si trovano nei forni dimostrano anche che le popolazioni dell'antica Età del ferro raccoglievano la legna negli immediati dintorni - nella savana erbosa - anziché recarsi nelle folte foreste di montagna che si trovavano a una certa distanza.

La quantità di legna che occorreva per la fusione era considerevole. In effetti la richiesta di legna potrebbe essere stata in definitiva abbastanza grande da modificare l'ambiente in cui i fonditori vivevano. Nel 1978 una fusione sperimentale fu eseguita nei pressi della cittadina di Gisagara, nella regione di Kabuye. In una sola fusione con il piccolo forno sperimentale di Gisagara furono consumati circa 95 chilogrammi di carbone di legna. Per produrre questa quantità di carbone occorsero 15 alberi con tronco del diametro di 14-16 centimetri. Quest'esempio mostra come, in un periodo di vari secoli, il consumo di legna per la fusione del ferro (assieme all'allevamento e all'agricoltura) potrebbe avere condotto alla deforestazione. Questa, a sua volta, potrebbe aver reso impossibile la prosecuzione della fusione, cosa che spiega forse perché dopo il 500 d.C. non si trovino più forni a Kabuye: l'area fu abbandonata quando gli alberi si esaurirono.

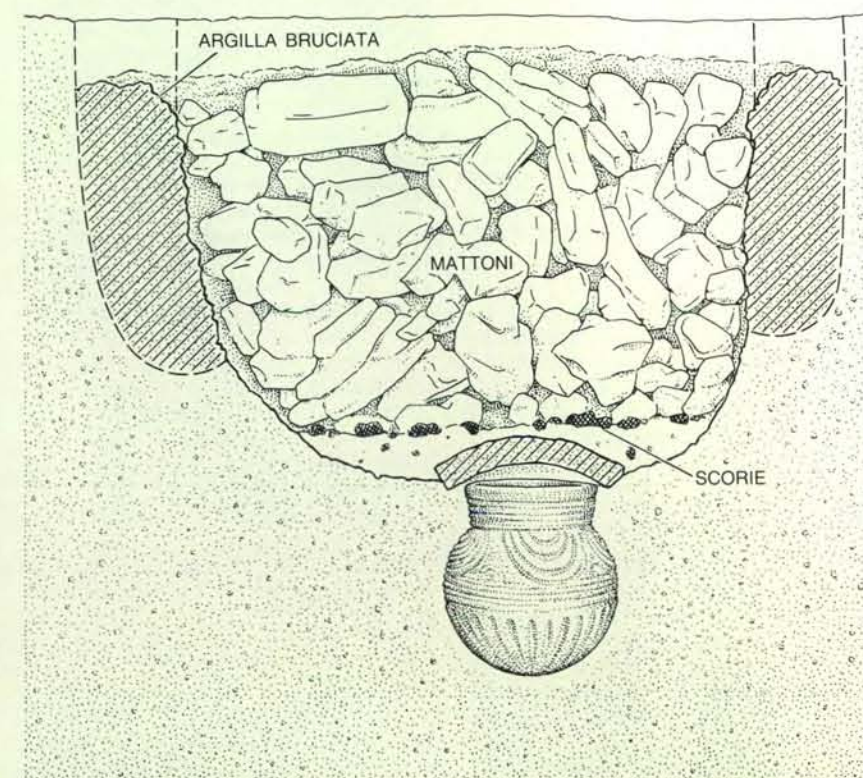
La regione interlacustre dell'Africa centrale è compresa tra il lago Victoria e una serie di laghi minori. Le ricerche degli autori e di altri studiosi dimostrano che nell'antica Età del ferro l'area fu caratterizzata da una sorprendente uniformità tecnologica basata sui forni a tino. Urewe è il sito in cui furono trovate per la prima volta ceramiche dell'antica Età del ferro, mentre a Bishange furono scoperti i primi resti di forni a tino. Sulle colline presso Kabuye furono trovati 23 siti di forni. La zona di Buhaya ha fornito alcune delle date più antiche per la fusione del ferro nella regione interlacustre.

In ogni modo, il metodo con cui il carbone di legna veniva prodotto è oggi ben conosciuto sia grazie a documenti storici, sia a ricostruzioni etnografiche. Nel Ruanda il metodo tradizionale cominciava con lo scavo di una buca larga da uno a due metri e profonda 60-80 centimetri. Nella buca si bruciavano innanzitutto erbe e rami per ottenere uno strato di cenere calda, a cui venivano poi sovrapposti rami e sterpi di medie dimensioni. L'intera massa veniva quindi ricoperta con uno strato di erbe o foglie bagnate e lasciata bruciare lentamente. Il carbone di legna, che grazie alla lentezza della combustione conserva la forma originaria dei rami, è pronto in 24 ore.

Mentre veniva prodotto il carbone di legna, si preparava probabilmente il forno. Nella regione interlacustre si conoscono due tipi di forno. Quello del primo tipo era semplicemente un incavo nel terreno ed è ben noto da documenti etnografici. Il forno del secondo tipo ha un tino molto alto eretto al di sopra dell'incavo, per contenere il carbone e il minerale. Come i bassoforni, anche questi forni a tino, veri e propri «altoforni», sono conosciuti dalle relazioni etnografiche, dalle quali apprendiamo che i due tipi di forno erano usati l'uno accanto all'altro: il forno a tino veniva usato per la fusione iniziale e il bassoforno per raffinare il prodotto ottenuto inizialmente. Nella documentazione archeologica dell'antica Età del ferro della regione interlacustre, però, si trovano solo i resti di forni a tino ed è su questi che concentreremo la nostra attenzione.

Nella costruzione di un forno a tino, la fase iniziale consisteva nello scavo della buca. Non è facile dire con precisione quanto fosse grande la buca stessa, poiché in molti casi l'erosione del suolo e l'attività svolta dall'uomo hanno condotto alla distruzione della parte alta dell'incavo. Gli esemplari in cui si conserva il bordo bruciato ci inducono a pensare che il diametro della buca fosse in qualche caso di circa 1,4 metri e la profondità di circa 75 centimetri. Il fondo e la parete dell'incavo venivano talvolta sottoposti a una particolare rifinitura, che in qualche caso consisteva nel rivestirli con argilla. Almeno uno dei forni di Kabuye (chiamato Kabuye I) era rivestito di pali di legno.

Tali rivestimenti avevano senza dubbio una funzione pratica, ma in varie regioni sono stati trovati sul fondo del-

Nel sito di Kabuye IV sono stati rinvenuti i resti dell'incavo che si trovava sotto il tino di un forno; il suo diametro è all'incirca di 70 centimetri. (Ciascuna divisione della freccia è lunga 10 centimetri.) I frammenti di argilla visibili nell'incavo sono i resti dei mattoni con i quali era stato costruito il tino e degli ugelli che facevano pervenire ossigeno al fuoco.

Questa sezione dell'incavo alla base di un forno si riferisce al sito di Kabuye II. Le zone di argilla bruciata ai margini sinistro e destro sono le fondazioni della parete del tino. Le scorie sono i rifiuti del processo di fusione. Il vaso sotto il fondo dell'incavo conteneva materiali che avevano indubbiamente un significato magico per il processo di fusione.

la buca oggetti che probabilmente non avevano alcuna funzione utilitaria. A Buhaya, nella Tanzania nordoccidentale, l'oggetto era semplicemente un pezzo di ferro fuso che era stato posto in un piccolo buco sul fondo dell'incavo, coperto da un blocchetto di arenaria. A Bishange nel Kivu, nello Zaire orientale, Hiernaux e la Maquet hanno trovato cocci di ceramica al centro di un incavo. Essi hanno formulato l'ipotesi che i cocci fossero i resti di un recipiente destinato a raccogliere il ferro fuso sul fondo del forno. Come vedremo, però, il processo di fusione nei forni a tino dell'antica Età del ferro non si conciliava con tale funzione.

Gli esempi più spettacolari di questi oggetti non utilitari furono trovati nel Ruanda. Sia nel sito di Kabuye II, sia a Mutwarubona II sotto il punto più basso dell'incavo erano stati sepolti un piccolo vaso e il suo coperchio. Entrambi i vasi sono atipici in termini archeologici: essi differiscono dalla ceramica utilitaria che si trova comunemente in associazione con i forni. La loro forma anomala induce a pensare che possano essere stati prodotti appositamente per la fusione; forse non furono opera degli stessi vasai che producevano le comuni ceramiche d'uso. In tempi storici nella regione interlacustre la ceramica veniva prodotta dalle donne, mentre la fusione era lavoro da uomini. Può darsi che questi vasi speciali venissero realizzati dai fonditori nell'ambito di preparativi rituali per la fusione.

È indiscusso che vi fossero preparativi rituali: lo hanno evidenziato taluni particolari osservati durante la ricostruzione effettuata tra i Madi dello Zaire. Benché ai Madi fosse stato chiesto di compiere tutte le operazioni di fusione sotto gli occhi degli osservatori, i fonditori avevano in realtà scavato e preparato la buca prima dell'arrivo degli osservatori. Sotto la base dell'incavo era stato scavato e colmato un piccolo foro. In seguito alle nostre insistenze, esso fu aperto, rivelando un ceppo collocato verticalmente e pezzi di vari tipi di legno tagliati con cura. Al di sopra vi era un groviglio di liane e un'impalcatura di tre bastoni. Il tutto era stato coperto con foglie e con altri due pezzi di legno e poi sepolto. Dopo l'esperimento, il permesso di scavare sotto l'incavo per riportare in luce questi materiali fu negato, il che fa pensare che gli oggetti sepolti avessero un significato magico.

A un livello più pratico l'incavo, una volta completato, veniva forse riempito con fusti di papiro ed erbe. I fusti non servivano probabilmente come combustibile, poiché le scorie trovate in antichi forni portavano tracce di fusti non bruciati e persino di foglie fresche. La funzione delle erbe non è ben chiara; può darsi che servissero a separare il ferro dalle scorie fuse, lasciando colare queste ultime e trattenendo il metallo. Tale metodo di separazione si applica soprattutto ai forni a tino; nei bassoforni costruiti per esperimento dai Madi le scorie venivano spesso lasciate semplicemente gocciolare in una buca sotto l'incavo e ivi raccolte. Se le scorie venivano effettivamente separate dal metallo per mezzo delle erbe, il vaso in ceramica trovato sotto l'incavo nei forni a tino non poteva servire per raccogliere ferro fuso, poiché questo rimaneva più in alto nel forno e non colava mai fino in fondo.

Scavato l'incavo, era il momento di preparare l'argilla per la costruzione del tino. L'argilla usata nel Ruanda nell'antica Età del ferro contiene una quantità considerevole di minerali come quarzo, miche e feldspati. Tali minerali servivano a temperare l'argilla, dandole la resistenza necessaria a sopportare il forte calore del forno. Una buona fonte di argilla ricca di minerali sono i formicai; alcuni etnografi hanno descritto come l'argilla venisse presa dai formicai, impastata, essiccata e poi pestata prima dell'uso. Una volta preparata l'argilla in questo modo, venivano talvolta aggiunti a essa altri materiali, come pezzi di coccio di varie dimensioni, per temperarla ulteriormente, dopodiché poteva cominciare la costruzione del tino.

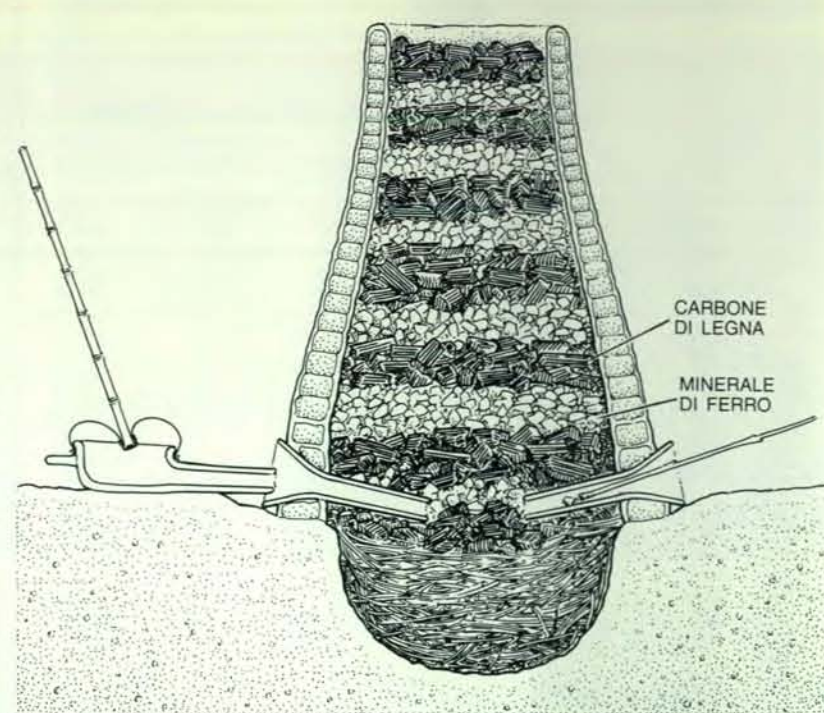
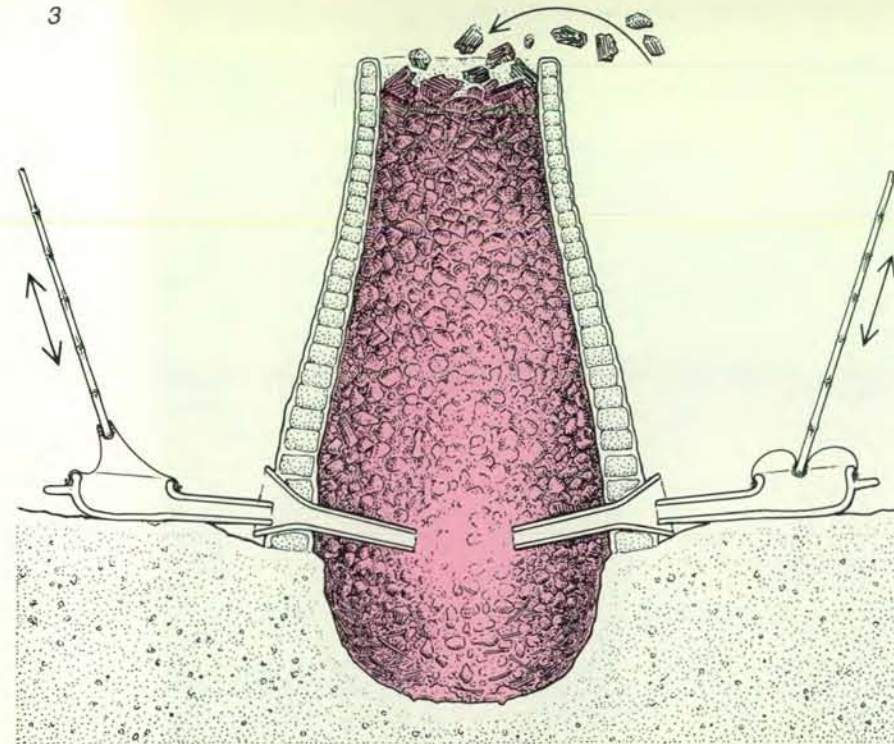
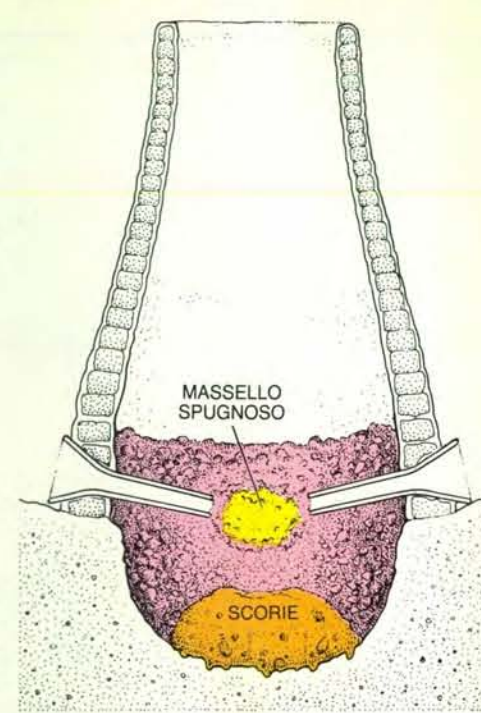
Per creare l'ambiente adatto al processo di fusione, la parete del tino doveva avere eccellenti proprietà di isolamento termico. Uno dei motivi è che la fusione comportava non solo la separazione delle scorie dal ferro, ma anche la riduzione chimica di quest'ultimo dalla forma di ossido a quella di metallo (Fe). Tale riduzione richiede che l'ossigeno nell'atmosfera del forno sia mantenuto a un livello minimo e questa è una delle funzioni assolte dalla parete del tino. Sembra chiaro, dagli scavi eseguiti nella regione interlacustre, che l'atmosfera riducente venisse ottenuta grazie a una tecnica di costruzione basata su una combinazione di mattoni e di lunghe spire di argilla, a forma di corda arrotolata.

I mattoni, che venivano essiccati al sole, pare formassero la parte inferiore del tino. Una ragione per adottare questa soluzione era che i mattoni singoli costituivano una struttura in grado di dilatarsi e contrarsi più facilmente, senza fessurarsi, rispetto a una struttura formata con spire di argilla; questa flessibilità aveva un'importanza grandissima presso la base del tino, dove si avevano le temperature più alte. A quanto pare, i mattoni, che costituivano un basamento solido per la parte superiore del tino, non venivano sottoposti preventivamente a cottura. Dopo essere stati essiccati al sole venivano utilizzati direttamente nella costruzione della parete del tino e cuocevano durante il processo di fusione. L'analisi paleomagnetica - basata sul fatto che l'argilla, sottoposta ad alte temperature, fonde parzialmente e i cristalli di minerali in essa contenuti si allineano con il campo magnetico prevalente - indica che alcuni mattoni furono esposti al fuoco più volte in posizioni diverse e fa pensare che essi venissero recuperati ancora in buone condizioni da vecchi forni per essere riutilizzati in forni di nuova costruzione.

La parte superiore della parete veniva costruita per mezzo di una tecnica analoga ai metodi di «modellatura a cercine» (o a colombino) che hanno un'origine antica e sono tuttora usati nella produzione di vasi di ceramica. Nella modellatura di vasi con questa tecnica la forma di partenza è un disco di argilla bagnata. Altra argilla viene poi modellata in forme allungate, simili a corde o a serpenti, che vengono avvolte e compresse, sovrapponendole a formare la parete del recipiente. Una volta completato il vaso, tanto la parte interna della parete quanto quella esterna vengono levigate e decorate. A una scala considerevolmente più grande (i tini più alti raggiungono l'altezza di più di tre metri), il metodo di costruzione per sovrapposizione di spire di argilla fu usato per costruire i forni a tino per la fusione del ferro.

L'analisi archeologica ha fornito molti particolari sul modo in cui questo tipo di costruzione veniva effettivamente realizzato. Gli strati sovrapposti non aderivano assieme, come sarebbe accaduto se fossero stati disposti l'uno sull'altro ancora bagnati. Si deve concludere perciò che la costruzione veniva eseguita in modo graduale, lasciando essiccare per breve tempo uno strato prima di aggiungere il successivo. Sembra che i costruttori lavorassero soprattutto in senso antiorario. Ogni volta che veniva aggiunto uno strato fresco, lo si premeva in loco con le dita, lasciando una sequenza di impronte nell'argilla umida. Alcuni archeologi hanno scambiato tale sequenza per un motivo decorativo, ma secondo noi essa è semplicemente una conseguenza della tecnica di costruzione del tino. A sostegno della nostra opinione c'è il fatto che, quando il tino era completato, veniva intonacato all'interno e all'esterno, cosa che avrebbe inevitabil-

Queste fotografie illustrano sei fasi della lavorazione del ferro tra i Madi, una popolazione dello Zaire settentrionale. Si accende il fuoco (*in alto a sinistra*); il tubo con l'estremità a forma di imbuto è un ugello. Il fuoco brucia bene (*in alto a destra*). Le scorie fluiscono dall'incavo in una buca sottostante (*al centro a sinistra*). La fusione è terminata: l'ugello è stato rimosso e il ferro si presenta nel forno come una massa spugnosa (*al centro a destra*). I frammenti di ferro vengono asportati dal forno (*in basso a sinistra*). Il ferro viene nuovamente riscaldato e martellato per allontanare carbone e impurezze (*in basso a destr*...

Gli autori hanno ricostruito il processo di fusione in forni a tino nell'antica Età del ferro. Il tino veniva intonacato e cinto esternamente da liane per dargli maggiore robustezza (*1*). Alla base erano disposti radialmente gli ugelli e il tino veniva caricato con strati alterni di carbone di legna e di minerale di ferro (*2*). Nell'apertura di ogni ugello veniva inserito un mantice. Il fuoco era acceso con un tizzone ardente e altro carbone era aggiunto dall'alto (*3*). Dalla fusione si ottenevano un massello spugnoso di ferro e scorie (*4*).

mente nascosto qualsiasi «decorazione» che fosse stata ottenuta per pressione delle dita sugli strati.

L'intonacatura con materiali refrattari rendeva la parete più resistente e ne migliorava le qualità di isolamento termico, contribuendo in tal modo all'instaurarsi di un'atmosfera riducente all'interno. Il rifacimento dell'intonaco rendeva inoltre possibile la preparazione del forno per un'altra fusione o il ripristino di un forno caduto in disuso. Questo è ciò che accadde nello Zambia durante la seconda guerra mondiale, quando le importazioni di ferro furono soggette a restrizioni. Per compensare l'assenza di importazioni i Lungu intonacarono di nuovo i loro forni e ripresero a fondere il minerale con le tecniche dell'Età del ferro.

La durata di un forno dipendeva dal tipo. I bassoforni venivano usati una sola volta prima di essere smantellati per rendere possibile il prelievo del ferro. I forni a tino rappresentavano invece un investimento maggiore di forza lavoro. I forni usati ancora in epoca recente dai Fipa, in Tanzania, sono alti anche due o tre metri. Quelli costruiti durante l'antica Età del ferro erano alti probabilmente due metri o più. Sarebbe stato un inutile spreco di risorse ricostruire una simile struttura ogni volta che si eseguiva una fusione, cosicché questi forni dovevano essere con ogni probabilità riutilizzati per molti anni. Con liane e pali più robusti si edificava un'impalcatura che aveva il compito di accrescere la solidità globale della costruzione, oltre a quello di fornire una piattaforma per il carico di combustibile e minerale. Grandi lastre di argilla bruciata rinvenute assieme ai resti dei forni potrebbero aver costituito sportelli che permettevano ai fonditori di raccogliere il ferro dopo la fusione senza dovere per questo smantellare il forno.

L'esigenza di avere un'atmosfera riducente efficace giustifica in parte la forma dei forni: il forno a tino alto e stretto poteva essere caricato con minerale e carbone di legna, riempiendo lo spazio interno e mantenendo minima la quantità di ossigeno. Ma l'ossigeno era necessario per la combustione, cosicché si dovette trovare un mezzo per immetterlo laddove serviva per alimentare il fuoco, senza permettergli di diffondersi nell'intera struttura. Il metodo più semplice era quello di praticare aperture alla base del forno, attraverso le quali potesse entrare l'aria: altrimenti si poteva far ricorso a correnti d'aria forzate. Ricerche archeologiche recenti fanno pensare che il tiraggio forzato sia stato usato in tutti i forni a tino.

Nel sistema di tiraggio forzato gli ugelli avevano una funzione basilare. Questi tubi di argilla sono noti da descrizioni etnografiche e anche da scavi archeologici. In base alla documentazione etnografica, sembra che tutti gli ugelli venissero costruiti in maniera simile. L'argilla, preparata con cura, veniva compressa attorno a paletti di legno di sezione circolare; quando si era essiccata un poco, si estraeva il paletto, ottenendo un tubo di argilla. Questi tubi, talvolta connessi in serie, venivano inseriti alla base del forno. L'estremità esterna del tubo poteva essere foggiata a imbuto per facilitare l'ingresso dell'aria. Un imbuto di questo genere fu scoperto nella parete di un forno riportato in luce a Gisagara, a conferma dell'ipotesi che nei forni dell'Età del ferro si usasse il tiraggio forzato.

È molto probabile che nell'estremità esterna degli ugelli venissero introdotti mantici. Nessun mantice è stato finora trovato in un contesto archeologico, ma essi sono attestati abbondantemente nella documentazione etnografica della regione. I mantici attualmente in uso sono costituiti da una grande conca formata da argilla o scavata nel legno, collegata a una canna da soffio. La parte superiore aperta della conca è coperta da una pelle di animale, alla quale è applicato talvolta un bastone. Alzando e abbassando il bastone si costringe l'aria a entrare, attraverso gli ugelli, nel centro del forno.

Una volta completati tutti i preparativi, il forno era pronto per essere caricato. Quando cominciava il carico, le pareti del tino dovevano essere piuttosto indurite, poiché non si è trovato alcun pezzo di carbone di legna o di minerale incorporato nei mattoni. L'operazione di carico consisteva nell'introdurre nel tino carbone e minerale, probabilmente in strati alterni che riempivano più o meno completamente lo spazio interno. Non essendovi grandi aperture alla base del forno, il carico del carbone e del minerale doveva aver luogo dall'alto, utilizzando le impalcature.

Una volta completato il riempimento del forno, si provvedeva all'accensione con un pezzo di carbone di legna ardente introdotto attraverso un ugello fino al centro del forno, alla sua base. Quando il fuoco cominciava a diventare caldo, si avviava il processo di fusione. La fusione comprende in realtà due fasi: la riduzione dell'ossido di ferro a ferro metallico e la separazione del ferro dai minerali associati, che vengono eliminati come scorie. Chimicamente, il processo che ha luogo per primo è quello della riduzione. L'ossigeno, introdotto attraverso gli ugelli, si combina con il carbonio presente nel carbone dando monossido di carbonio (CO). Il monossido di carbonio estrae l'ossigeno dall'ossido di ferro, formando anidride carbonica (CO_2) che risale su per il tino e sfugge all'esterno, e ferro metallico. La riduzione ha inizio a una temperatura di circa 800 gradi Celsius.

La seconda fase, la separazione delle scorie dal ferro, comincia attorno a 1150 gradi Celsius, la temperatura alla quale i minerali indesiderati cominciano a fondere. Il punto di fusione del ferro è circa 1540 gradi. Poiché non si aveva alcun vantaggio dalla liquefazione (fusione completa) del ferro, parte della perizia tecnica dei fonditori doveva consistere nel mantenere la temperatura di funzionamento del forno fra i 1150 e i 1540 gradi, che sono comunque temperature notevoli considerati i semplici materiali usati nella costruzione del forno. Il risultato del processo era un massello di ferro di aspetto spugnoso. Questo, che conteneva fra le altre impurezze carbone e scorie, veniva estratto dal forno e poi riscaldato e battuto fino a essere depurato. Quindi il ferro veniva foggiato in armi, utensili e ornamenti.

Benché gli aspetti tecnici della fusione stiano cominciando a chiarirsi, il suo contesto sociale e culturale purtroppo non è ancora ben compreso: qualsiasi cosa si possa dire in proposito è destinata a rimanere in qualche misura speculativa. La produzione del ferro deve aver comportato un uso intensivo di forza lavoro e un grande dispendio di materia prima. La forza lavoro era richiesta non solo per raccogliere la legna, ma anche per prelevare e trasportare il minerale, per preparare l'argilla, per costruire gli ugelli e far funzionare i mantici. Il coordinamento della mano d'opera e la sorveglianza sul prodotto fanno pensare a un'organizzazione efficiente e forse anche a un controllo centralizzato. Non è però del tutto chiaro da chi tale controllo fosse esercitato durante l'antica Età del ferro.

Gli aspetti sociali e culturali della tecnologia nell'Età del ferro sono molto più difficili da mettere in luce di quelli tecnici, perché gli elementi di cui disponiamo in proposito sono meno consistenti. Si può dire però con una certa sicurezza che il fonditore dev'essere stato una persona importante nella regione interlacustre durante l'antica Età del ferro. Egli era il custode di una complessa conoscenza rituale e di abilità tecniche che avevano grande importanza per la società in cui viveva. Anche se non siamo ancora in grado di capire a fondo le relazioni sociali che circondavano il suo lavoro, grazie alle scoperte recenti abbiamo cominciato a capire la tecnologia di cui egli fu maestro.

BIBLIOGRAFIA

VAN NOTEN FRANCIS, *The Early Iron Age in the Interlacustrine Region: The Diffusion of Iron Technology* in «Azania», 14, pp. 61-80, 1979.

VAN NOTEN FRANCIS, *The Archaeology of Central Africa*, Akademische Druck- und Verlagsanstalt, 1982.

RAYMAEKERS J. e VAN NOTEN F., *Early Iron Furnaces with "Bricks" in Rwanda: Complementary Evidence from Mutwarubona* in «Azania», 21, pp. 65-84, 1986.

(RI)CREAZIONI AL CALCOLATORE

di A. K. Dewdney

Immaginazione e geometria si incontrano nel regno cristallino dei reticoli

Anche se i calcolatori stanno insinuandosi, suono per suono e pixel per pixel, nel mondo delle arti, rimangono ancora aperti agli esseri umani enormi settori di ricerca. I disegni a cui io dò il nome di reticoli non vengono presentati sullo schermo dei calcolatori, ma su comuni fogli di carta. Non sono prodotti in pochi secondi da un programma per calcolatore, bensì emergono lentamente dal lavoro di un righello e di un compasso guidati dalla mano dell'uomo.

L'origine di questi disegni sta nell'incontro tra l'immaginazione e un insieme di cerchi disposti a griglia. Chiunque può divertirsi a produrre un sorprendente intreccio di linee tale da lasciare la mente confusa e deliziata. I disegni sono simili a quelli che si trovano su antiche tombe, moschee e palazzi da Samarcanda a Siviglia. Le decorazioni rettilinee del mondo islamico medioevale danno l'idea dell'infinito in uno spazio finito. Gli artigiani usavano i metodi che mi appresto a descrivere? Gli esperti non sanno con certezza quali metodi usassero, ma certo nei disegni riverbera l'eco di nozioni matematiche che vanno dalla geometria alla topologia.

Ci sono molti modi per considerare un reticolo, ma forse la cosa migliore è iniziare a osservarlo dal punto di vista della simmetria. La versione definitiva dell'esemplare riprodotto qui sotto, per esempio, ha un alto grado di simmetria: ruotandolo di 120 gradi intorno a certi punti si ottiene un disegno identico. Anche operando una riflessione lungo certe linee si ottiene un disegno quasi identico. Gli elementi principali del disegno sono strisce dorate che si intrecciano come piccole strade mentali attraverso un paesaggio potenzialmente infinito. In tutta la raffigurazione i cerchi sono spaziati secondo la simmetria che sta alla base del disegno. Le strisce vanno da un cerchio all'altro, convergendo 12 alla volta e poi allontanandosi improvvisamente. L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza. A loro volta le strisce formano figure, in questo caso esagonali o a zig-zag. In qualsiasi punto si guardi, i «sottopassaggi» si alternano ai «cavalcavia». In che modo è stato ottenuto questo effetto?

I reticoli appartengono a un'ampia classe di configurazioni infinite che hanno almeno due simmetrie di traslazione indipendenti: se si effettua una traslazione, ovvero si fa scivolare la configurazione su una sua copia nell'una o nell'altra direzione, alla fine le due configurazioni risulteranno allineate l'una con l'altra. Per quanto ingegnoso sia il modo in cui si disegna una configurazione infinita, se ha due traslazioni indipendenti essa apparterrà inevitabilmente a uno dei 17 possibili gruppi cristallografici classificati dallo scienziato russo Evgraf S. Fedorov. Se si considera l'enorme quantità di reticoli ereditati dal passato, non c'è da stupirsi se si possono trovare esempi di tutti i 17 gruppi, sia che occhieggino timidamente dalla griglia della finestra

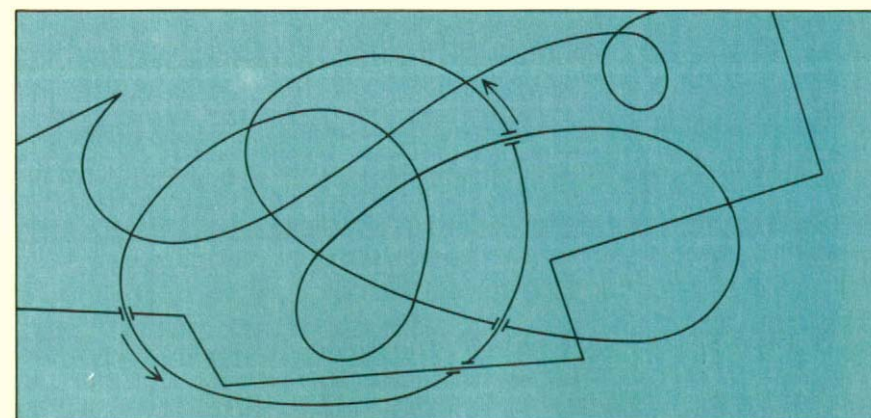
Vari stadi nella costruzione di un reticolo

di un palazzo sia che proclamino la grandezza del sultano nella sala delle udienze.

Le traslazioni sono solo una delle quattro possibili operazioni di simmetria che si possono effettuare su un piano su cui sia tracciato un disegno. Una riflessione fa ruotare il piano come una grande porta intorno a una linea che giace sul piano stesso. È in sostanza quello che avviene con uno specchio, in cui le lettere appaiono rovesciate e le facce leggermente diverse. La terza operazione di simmetria è la rotazione: il piano viene ruotato di un certo angolo intorno a un unico punto. La quarta e ultima operazione di simmetria è chiamata transriflessione e consiste in una traslazione seguita da una riflessione lungo una linea parallela alla traslazione.

Le operazioni di simmetria (di qualsiasi tipo) possono essere combinate semplicemente effettuandole in una certa successione. Da tutto questo emerge una struttura algebrica chiamata gruppo. In un gruppo il prodotto di due operazioni qualsiasi è un'operazione e per ogni operazione esiste un'operazione inversa che effettivamente la annulla. Inoltre un gruppo ha un cosiddetto elemento identità (l'operazione nulla). Un gruppo deve anche soddisfare la legge associativa: quando si effettuano tre operazioni in successione, non ha importanza se la terza operazione segue le prime due o se le ultime due seguono la prima. Detta in questi termini, la legge sembra un po' banale, ma solo perché nel caso delle operazioni di simmetria sul piano la legge associativa appare manifestamente vera. Il gruppo di simmetria del reticolo dato nell'esempio è chiamato *p*6 nel linguaggio cristallografico internazionale. La sua caratteristica è di avere rotazioni di 60 gradi intorno a un insieme di centri e rotazioni di 120 gradi intorno a un altro insieme. I lettori non avranno difficoltà a individuare nell'illustrazione questi centri.

Il disegno è stato prodotto da me qualche anno fa con il metodo che delineerò più avanti. In seguito scoprii lo stesso disegno in un libro sull'arte islamica del periodo medioevale. La mia delusione per essermi visto preceduto fu ampiamente compensata dalla scoperta stessa: il metodo sembrava confermato. Da allora ho avuto la fortuna di «riscoprire» altri disegni.

Il metodo richiede innanzitutto che l'artigiano prepari una griglia di punti. Sono solamente quattro i tipi possibili di griglie: triangolare, quadrata, rettangolare o esagonale. È facile tracciare queste griglie con l'aiuto di un righello e di un compasso: si disegna una linea di base, poi si usa il compasso per segnare punti posti a distanze regolari. Le griglie quadrate e rettangolari utilizzano una costruzione ad angoli retti per aggiungere nuovi punti sopra e sotto la linea di base; quelle triangolari ed esagonali richiedono invece triangoli equilateri.

Applicazione della regola «sopra-sotto»

L'origine del disegno che stiamo esaminando è una griglia triangolare. Si disegna poi una circonferenza intorno a ciascun punto della griglia. Qui l'intuizione fa la sua prima comparsa, in quanto la dimensione delle circonferenze ha un'importanza determinante. Fra poco spiegherò il ruolo che l'intuizione può svolgere nella scelta della dimensione.

Una volta disegnate tutte le circonferenze, l'artigiano dilettante sceglie su di esse punti a distanza regolare, ai quali faranno capo gli elementi lineari del disegno. La posizione e il numero dei punti devono riflettere la simmetria della griglia stessa. In altri termini, i punti devono conservare la simmetria rispetto alle riflessioni e alle rotazioni. Ognuna delle simmetrie designate dovrebbe portare i punti che si trovano su una circonferenza su punti di un'altra o della medesima circonferenza. Nell'esempio che stiamo costruendo, il numero di punti su ciascuna circonferenza deve essere un multiplo di 3. Personalmente ho scelto 12 per dare corposità al reticolo. Dato che la configurazione sottostante doveva avere una simmetria di riflessione, i punti sul cerchio potevano assumere solo due posizioni. Ho scelto la posizione in cui sei dei punti erano il più vicini possibile alle circonferenze circostanti. Come regola generale, quando è possibile effettuare una scelta, la decisione migliore è quella in armonia con una simmetria già presente.

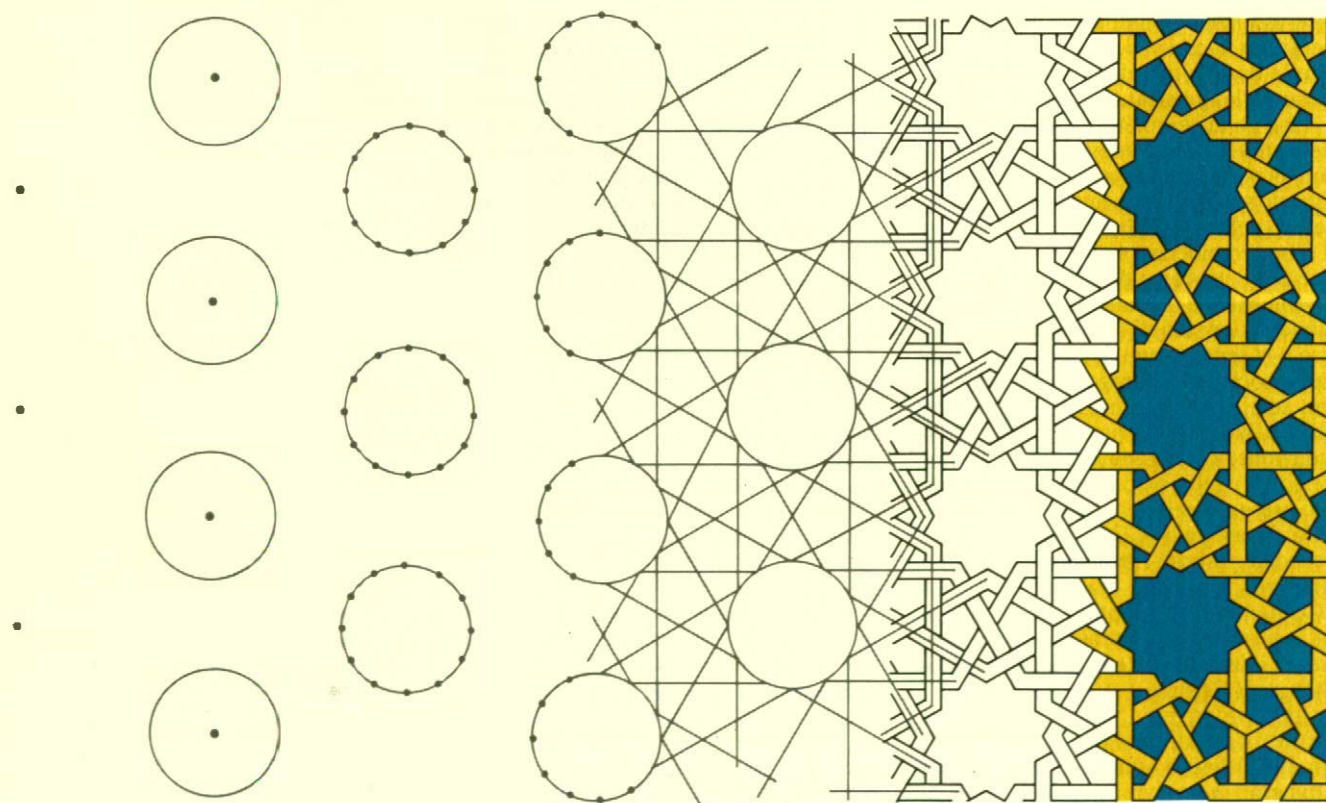
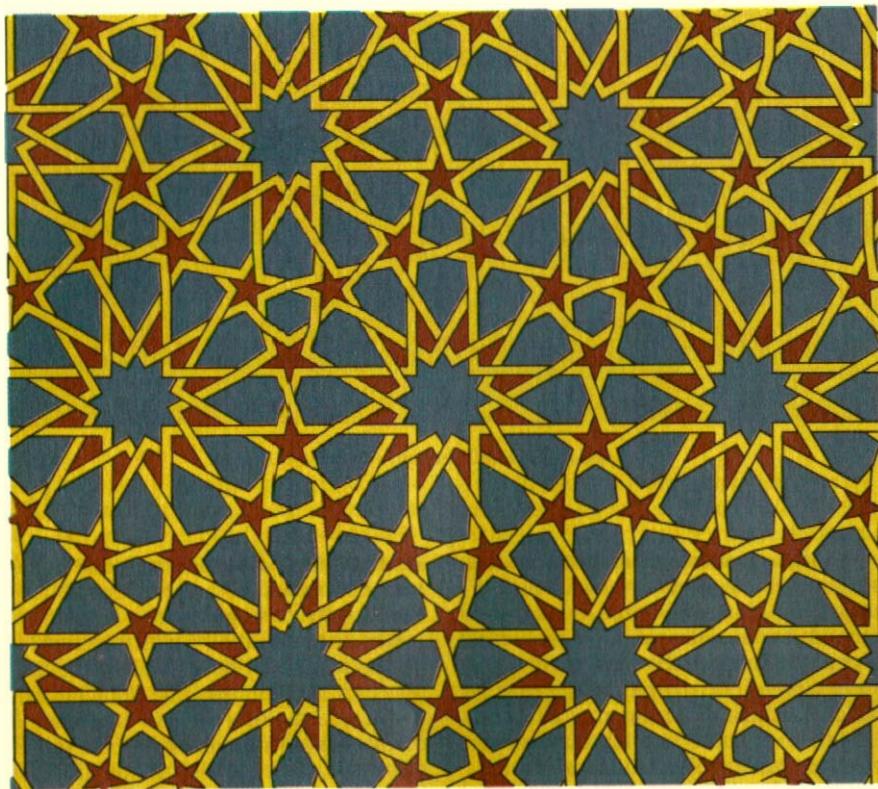
Nello stadio successivo della costruzione si uniscono i punti tracciati su ciascuna circonferenza con i punti su altre circonferenze. A questo punto entra in gioco nuovamente l'intuizione. Le possibilità appaiono anzi talmente numerose che sembrerebbe di poter contare esclusivamente sull'intuizione. In realtà, le possibilità combinatorie sono ancora una volta fortemente limitate da condizioni di simmetria: se unisco un certo punto sulla circonferenza *A* con un altro punto sulla circonferenza *B*, le simmetrie della configurazione trasferiscono quel collegamento ad altri punti sulla circonferenza *A*. Prima ancora di aver disegnato più di due linee, può essere necessario cancellare l'esperimento e tentare un altro collegamento.

Una specie di anello di retroazione lega questa fase del disegno alla precedente scelta della dimensione della circonferenza. Una volta emerso uno schema di interconnessione in apparenza soddisfacente e coerente, il risultato può rivelarsi invece innaturale, per non dire sgradevole: le linee non si armonizzano con la simmetria della configurazione di base. Di solito, in questo caso risulta evidente se sia possibile, aumentando e diminuendo opportunamente il diametro dei cerchi, creare collegamenti che si accordino con le principali simmetrie del disegno. L'intuizione può far scattare l'illuminazione, come una specie di colpo di genio artistico e agli occhi della mente appaiono all'improvviso le linee generate dalle nuove circonferenze.

Una certa eccitazione, a questo punto dell'apprendistato, provoca un leggero tremito nel compasso e nel righello. Uno stupore che sta forse a metà tra l'artistico e il matematico afferra chi tiene in mano gli strumenti. Si deve dar credito a un'intuizione che può solo aspirare alla dignità geometrica?

In ogni caso, è giunto il momento di pavimentare le strade del pensiero dando loro una certa larghezza. Nessun sistema stradale sofisticato può tollerare semafori e allora come si possono intrecciare le nostre autostrade angolari? Nel caso della tessitura, dopo tutto, l'intreccio alterna un passaggio sopra e un passaggio sotto. Può capitare che l'artigiano si trovi spinto in un vicolo cieco logico in cui una strada deve affrontare due sottopassaggi consecutivi? La topologia risolve il problema.

Un piccolo esperimento ci farà capire come. Si disegni un rettangolo di grandi dimensioni su un foglio di carta, poi si scarabocchi al suo interno seguendo solo queste due regole:

1. Se una linea inizia o termina, può farlo solo sul bordo del rettangolo.
2. In un punto non possono incrociarsi

Reticolo islamico

più di due linee (o parti della stessa linea).

Si può, per esempio, scarabocchiare qualcosa di simile alla composizione tra l'astratto e l'espressionista che si vede nella pagina precedente. Le linee possono avere tutte le curve e le svolte che si vuole e si possono incrociare ripetutamente l'una con l'altra.

Per trasformare lo schizzo nel più ingegnoso nodo immaginabile, basta ora seguire la regola «sopra-sotto»: partendo da un punto qualsiasi, seguire semplicemente una delle linee ripetendo «Sopra, sotto, sopra...». Naturalmente, quando si dice «sopra» bisogna costruire un cavalcavia per la linea che si sta seguendo, e costruire un sottopassaggio quando si dice «sotto». Alla fine, o si torna al punto di partenza o si arriva al bordo del rettangolo. Lungo il percorso, la strada può aver incrociato se stessa. Sorprendentemente, quando si arriva a un incrocio per cui si è già passati, questo ha già la struttura richiesta. In altri termini, non ci si trova mai ad aver bisogno di un cavalcavia a un incrocio dove è già stato disegnato un sottopassaggio. Una volta che si è finito di costruire tutte le strutture di attraversamento, lo schizzo scarabocchiato acquista un aspetto quasi intelligente.

Due reticoli in forma schematica

La regola sopra-sotto, in un certo senso, funziona perché deve funzionare. La dimostrazione più semplice, comprensibile a tutti, richiede una piacevole escursione mentale. Lo scarabocchio divide il rettangolo in molte piccole regioni, o pezzi, a cui si può attribuire un colore, scelto tra due solamente, in maniera tale che due regioni confinanti non abbiano mai lo stesso colore. (L'esposizione di una convincente dimostrazione elementare di questa proprietà richiederebbe al massimo qualche paragrafo, ma preferisco venire subito al punto cruciale.) Supponiamo che le regioni vengano colorate in questo modo usando, per esempio, il rosso e il blu. Muovendoci lungo una delle strade verso un incrocio, notiamo che o la regione sulla nostra destra è rossa e quella sulla sinistra è blu, oppure viceversa.

La soluzione per gli incroci si nasconde in questa semplice osservazione. Lavorando lungo una certa strada, la squadra addetta alla costruzione mentale saprà se costruire un sottopassaggio o un cavalcavia quando arriva a un incrocio. Se la regione a destra è rossa, costruisce un cavalcavia; se è blu costruisce un sottopassaggio. Lo stesso risultato (o forse la sua «immagine negativa») si avrebbe se la squadra seguisse la regola sopra-sotto formulata prima.

Usando la matita e il righello, il lettore intento alla progettazione del disegno può facilmente dare spessore a ciascuna linea tracciandole ai lati due linee parallele. Là dove fanno un angolo, queste linee possono dare qualche problema, ma il progetto procede più o meno meccanicamente. La procedura di ispessimento può ignorare gli incroci, che vengono affrontati alla fine, con una gomma per cancellare, ricorrendo alla regola sopra-sotto. Per creare un cavalcavia si devono cancellare i due segmenti di strada che attraversano la strada su cui si sta procedendo; basta questo perché il cavalcavia risulti pronto: la strada cancellata sembra passare sotto l'altra. Per creare i sottopassaggi si segue il procedimento opposto. È interessante notare che il procedimento di intreccio distrugge tutte le simmetrie di riflessione del disegno: dopo la riflessione il disegno può sembrare lo stesso, ma i sottopassaggi e i cavalcavia si sono scambiati di posto.

Gli stadi finali della creazione consistono nel passare a penna e colorare. Una buona penna seguirà il righello e produrrà una linea uniforme, con qualche interruzione agli angoli e agli incroci. Per passare a penna un disegno di media complessità ci vuole forse un'ora o anche più, ma che cos'è un'ora nel mondo senza tempo dell'artigiano? Durante questa fase c'è il tempo per pensare ad altre cose, quasi una sorta di meditazione senza vincoli.

Una volta passato a penna il disegno e cancellati tutti i segni a matita, si può passare direttamente alla fase della colorazione. Dato che non sempre i colori riescono bene come si vorrebbe, è forse preferibile fare una copia dell'originale e colorare la copia. In questo modo l'originale può produrre numerose repliche, ognuna più bella della precedente. Personalmente, suggerisco di usare la tempera: si stende in modo uniforme, increspa pochissimo la carta ed è disponibile in quasi tutti i colori, compresi l'oro e l'argento. Inoltre, sembra che i colori ad acqua come la tempera siano respinti dagli inchiostri xerografici e questo è un bene perché, a meno di avere la mano fermissima, è quasi impossibile evitare lo sconfinamento del colore sulle linee a inchiostro, mentre si vorrebbe che tutte le aree colorate fossero ben delimitate di nero per esaltare il contrasto.

La scelta dei colori è naturalmente una questione di gusto personale. I reticoli autentici usano spesso colori primari scuri e tenui per le regioni comprese tra le strisce. Questo fa sì che lo sfondo sembri ritrarsi dando maggiore rilievo al reticolo stesso. Nell'illustrazione nella pagina a fronte in alto si vede un altro disegno in cui si utilizza uno schema di colori del genere.

Questo secondo disegno è stato prodotto con metodi analoghi a quelli usati per il primo. I reticoli più avanzati hanno non solo quelli che si potrebbero chiamare cerchi primari di inflessione, ma anche cerchi secondari. Ciascuna stella a cinque punte del secondo disegno nasce da uno di questi cerchi secondari. Ho riportato anche altri due affascinanti esempi di reticolo in semplice forma schematica. In uno i cerchi primari e secondari sono collocati in corrispondenza di differenti centri di simmetria di rotazione; nell'altro, invece, sono concentrici (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte in basso*). Entrambi i reticoli si possono trovare in opere tradizionali.

I reticoli sono strettamente collegati alle tassellature bidimensionali: configurazioni prodotte disponendo diverse copie di un'unica forma senza sovrapposizioni. Ciascun reticolo può essere prodotto sotto forma di un'unica sagoma finita, più precisamente una piastrella. Sulla piastrella compare una piccola parte del disegno complessivo. Se si dispone di un gran numero di copie della piastrella, si può riprodurre il reticolo fino alle dimensioni volute collocando un numero adeguato di piastrelle nel modo corretto. Esaminando uno qualsiasi dei reticoli illustrati in questo articolo, si troverà una piccola area che può svolgere il ruolo di piastrella. Comunque per avere una visione più ampia di una configurazione del genere occorre costruite una specie di piastrella di carta e farne varie copie. Una volta che siano state colorate, le piastrelle si prestano a realizzare una gran quantità di decorazioni.

Ma i disegni a reticolo originali? Come erano prodotti e che cosa significavano? Lisa Golombek li ha studiati per molti anni, sia sul posto sia nel suo studio presso il Dipartimento di studi medio-orientali e islamici dell'Università di Toronto. A suo giudizio, la cosa più probabile è che i disegni fossero preceduti da una sorta di preparazione geometrica in forma di griglie e cerchi. Indubbiamente, poi, i singoli artisti adottavano varianti della tecnica base. Per quanto riguarda il significato, Lisa Golombek non accetta la spiegazione tradizionale secondo cui si usavano forme geometriche a causa della proibizione islamica di rappresentare figure umane o animali. Il suo parere è che i reticoli sono la rappresentazione di un ordine cosmico che è un segno caratteristico dell'Islam. Per esempio, nei resti di abitazioni private i reticoli compaiono insieme a opere figurative; visto che la proibizione era ignorata, è chiaro che i padroni di casa dovevano essere attratti dall'ordine cosmico.

Tutto considerato, non era esatto affermare che i calcolatori non hanno nulla a che vedere con la produzione di reticoli. Anche se può essere difficile programmare un calcolatore per fargli compiere quel tipo di scelte intuitive che portano a configurazioni pregevoli, sarebbe meno difficile scrivere quello che si potrebbe definire un programma per la progettazione assistita dal calcolatore. Un programma del genere predisporrebbe una griglia di punti secondo la scelta dell'utente umano, il quale potrebbe scegliere anche la dimensione dei cerchi, il numero dei punti e così via. Una volta indicati dall'utente i collegamenti da provare, lo schermo si riempirebbe dell'intrico di linee prescelto, risparmiando così buona parte del lavoro più noioso. La stampante darebbe poi, o almeno così si spera, il reticolo finito.

Nell'articolo di aprile si parlava di un orologiaio cieco e dei biomorfi, una creazione di Richard Dawkins, il celebre autore de *Il gene egoista*. A rigore, i biomorfi non sono una creazione di Dawkins, ma di un programma scritto da lui. Lo schermo di un calcolatore Macintosh è diviso in nove quadrati; quello centrale contiene una struttura a forma di albero e gli altri otto contengono varianti di tale struttura. L'utente sceglie una delle varianti, che va a occupare il centro della scena e genera a sua volta varianti di se stessa.

L'evoluzione guidata dall'uomo non produce alberi, ma forme a volte bizzarre e con gli aspetti più disparati, che vanno dall'insetto all'aereoplano. Nel suo libro, *L'orologiaio cieco*, Dawkins utilizza il programma per chiarire che, sebbene proceda a piccoli passi, l'evoluzione può nondimeno produrre creature notevoli. Quello che però lo infastidisce è il fatto che, nel suo programma, l'evoluzione non sia propriamente cieca. In che modo, egli si chiedeva nel suo libro, una data forma può emergere dall'interazione tra una specie e il suo ambiente?

A un convegno sulla vita artificiale, tenutosi lo scorso settembre al Los Alamos National Laboratory, un gran numero di scienziati e di dilettanti hanno sostenuto l'emergere di caratteristiche evolutive negli organismi da loro proposti. Nessuno ha soddisfatto Dawkins, presente al convegno. Rivendicazioni più recenti sono state portate alla mia attenzione da John Mitterer della Brock University nell'Ontario. Sono quelle di David C. Plaut, del Dipartimento di psicologia dell'Università di Rochester, e David A. Taylor di San Mateo, California. A un attento esame, lo studio di Plaut-Taylor mostra una generica somiglianza con molti dei progetti presentati a Los Alamos: una creatura semplice, dotata della capacità di procurarsi il cibo e di evitare altri organismi ostili sotto la guida di una rete di neuroni, mostra un certo comportamento. Le creature che non riescono a sopravvivere non avranno una progenie e non potranno quindi trasmettere il loro cervello dimostratosi poco adatto. Ma le creature ricevono in dotazione fin dall'inizio la rete di neuroni, mentre Dawkins vorrebbe che le reti stesse emergessero da qualche struttura più primitiva sotto la spinta di un ambiente favorevole alla competizione.

David M. Chess, un ricercatore del Thomas J. Watson Research Center dell'IBM, ritiene che sia in ogni caso più interessante simulare l'evoluzione del comportamento. Per esempio, il curvosauro da me descritto poteva mangiare il modello esistente di puntofita solo se il suo collo era abbastanza lungo da permettergli di raggiungere il succulento fogliame. Ma come se la caverà il curvosauro, si chiede Chess, a evitare i predatori con un collo del genere? Avrà problemi di pressione sanguigna alta, di lesioni al collo e così via?

Un altro dipendente dell'IBM, Donald E. Curtis di Kennesaw, Georgia, sostiene che si dovrebbe prestare maggiore attenzione al creazionismo scientifico. I sostenitori di questa teoria accettano la microevoluzione: una trasformazione graduale all'interno di una specie. Secondo Curtis, invece, «non esiste alcuna prova sperimentale o fossile di una macroevoluzione, cioè di una fondamentale trasformazione di una specie in un'altra».

BIBLIOGRAFIA

BOURGOIN J., *Arabic Geometrical Pattern and Design*, Dover Publications, Inc., 1973.

BURCKHARDT TITUS, *Art of Islam: Language and Meaning*, World of Islam Festival Publishing Company Ltd., 1976.

WEYL HERMANN, *La simmetria*, Feltrinelli, Milano, 1981.